
МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА
Л. П. КРАЙЗМЕР
В. П. СОЧИВКО
БИОНИКА
К

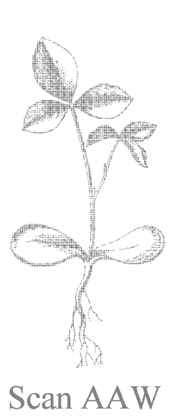
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 680

Л. П. КРАЙЗМЕР, В. П. СОЧИВКО

БИОНИКА

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1968

6П2.15
К 77
УДК 578·621.38

Крайзмер Л. П., Сочивко В. П.

К 77 Бионика, изд. 2-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 1968.

112 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 680.)

Книга посвящена изложению основных направлений бионики. Разбираются вопросы, связанные с процессами восприятия, хранения, передачи и переработки информации в живых организмах, и возможности использования этих знаний при разработке технических кибернетических систем для повышения их универсальности, гибкости и надежности Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
346-68

6П2.15

Крайзмер Леонид Павлович,
Сочивко Владимир Петрович
Бионика

Редактор *В. К. Лабутин*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Технический редактор *Л. М. Фридкин* Корректор *И. Д. Панина*

Сдано в набор 31/I 1968 г. Подписано к печати 7/VI 1968 г. **Т-08371**
Формат 84×108[1]/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 5,88 **Уч.-изд. л. 9,1**
Тираж 50 000 экз. Цена 37 коп. **Зак. 1104**

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

«От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности».

(В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 29, стр. 152—153).

ВВЕДЕНИЕ

Кибернетика как самостоятельное научное направление возникла в послевоенные годы. Истекшее десятилетие характеризуется бурным развитием кибернетики, которое выражается, с одной стороны, в углублении ее теоретических основ, а с другой — во все более широком использовании достижений кибернетики во всех областях науки, техники и промышленности.

Материальной базой развития теории и успехов использования достижений кибернетики явилось быстрое развитие кибернетической техники и в первую очередь быстродействующих электронных вычислительных машин дискретного действия.

В конце второй мировой войны в Филадельфийской технической школе была разработана машина ЭНИАК, предназначенная для расчетов в области баллистики. В процессе эксплуатации машины вскоре стало ясно, что ее можно использовать и для решения широкого класса других задач, например для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Принципиально современные электронные цифровые машины позволяют автоматизировать любой вид человеческой умственной деятельности, если он только может быть описан в форме алгоритма, т. е. системы правил, четко и однозначно определяющих процесс выполнения задания.

Одно из наиболее поразительных свойств цифровых вычислительных машин заключается в их универсальности, обусловленной, во-первых, возможностью сведе́ния сложных математических задач к определенной последовательности простейших арифметических операций и, во-вторых, возможностью описания математическими выражениями разнообразных процессов мыслительной деятельности человека.

Указанные возможности и являются основой того, что одна и та же вычислительная машина, выполняя только операции над числами, принципиально оказывается пригодной для решения сложнейших задач вычислительного характера, управления любыми производственными и транспортными процессами, выдачи справок и автоматического перевода с одного языка на другой, планирования и статистических расчетов, диагностики заболеваний и игры в шахматы, сочинения формально грамотных, хотя и не передающих эмоций художника, музыкальных или поэтических произведений и многих других функций. которые могли выполняться только человеком

Важно подчеркнуть при этом, что для перехода к новой области своей «деятельности» машина принципиально не требует ни переделок, ни изменения структуры или схемы, ни даже новой регулировки. Просто в нее нужно ввести новую программу, в которой и воплощается умственный труд человека, предвосхищающего все дальнейшие действия машины, которые должны привести к правильному решению порученной ей задачи.

Наряду с универсальностью машина характеризуется огромной скоростью выполнения арифметических операций. Если уже первые электронные вычислительные машины выполняли десятки и сотни операций в секунду, то в настоящее время созданы машины с быстродействием до нескольких миллионов арифметических операций в секунду над многоразрядными числами. Чтобы наглядно представить себе эту производительность, достаточно указать, что такая машина может в течение нескольких минут решить вычислительную задачу, на которую человеку необходимо затратить всю свою жизнь. В результате такой чисто количественный показатель, как число арифметических операций, совершаемых машиной в 1 *сек*, обусловливает появление у этих машин новых качеств. Применение вычислительной техники позволяет человечеству решать такие задачи, которые раньше были людям непосильны из-за их трудоемкости, так как для точного численного решения их требовались многие тысячи человеко-лет. Появилась возможность применения машин для управления быстропротекающими производственными процессами и различными видами сверхскоростного транспорта.

В этой области роль кибернетической техники в дальнейшем научно-техническом прогрессе человечества особенно важна. В самом деле, нервная система высших животных сформировалась в результате естественного отбора и воздействия окружающей среды в течение многих миллионов лет эволюционного развития. Человеческий род насчитывает около ста тысяч лет своего существования. В течение всего этого периода развития и формирования нервных механизмов и наши предки — животные и человек — сталкивались в окружающей среде с относительно малыми скоростями. Это были скорости движения воды в реках, ветра, бега других животных, полета птиц и пр. Все эти скорости, как правило, не превышали единиц, максимум десятков километров в час. К ним и приспособился механизм, осуществляющий важные для живого организма реакции на информацию, поступающую из внешней среды.

Время, необходимое человеку для выдачи в процессе управления целесообразного ответа на полученную информацию, складывается из времени, обусловленного инерционностью чувствительных элементов, времени проведения нервных импульсов от этих элементов к соответствующим центрам коры головного мозга и времени переработки информации мозгом, т. е. принятия целесообразного решения на основе полученной информации, времени проведения нервных импульсов от мозга к исполнительным органам и, наконец, времени срабатывания этих органов.

Это суммарное время от момента восприятия информации до осуществления реакции, как показывают результаты психофизиологических опытов, составляет не менее 0,1 *сек*. Таким образом, если навстречу друг другу летят два самолета со скоростью около 3 000 *км/ч* каждый и если один из них покажется из облаков на расстоянии 150 *м* от другого, то они столкнутся до того, как летчики приступят к необходимому маневру. Причина аварии в этом случае

будет заключаться в инерционности нервной системы человека и ограниченной скорости его реакций на внешние воздействия, обусловленной его биологической конструкцией.

Со значительно бо́льшими скоростями будут двигаться космические корабли, на которых будут осуществляться межпланетные сообщения, и, очевидно, быстрота реакции человека окажется совершенно недостаточной для предупреждения столкновения с внезапно встречающимися на их пути небольшими небесными телами типа метеоритов.

Аналогичные примеры можно привести для случаев управления такими быстропротекающими процессами, как атомные или химические реакции. В этих случаях, если даже оператор и успеет заметить, что процесс развивается в нежелательном направлении, то вследствие замедленной реакции человека процесс может закончиться взрывом или другой аварийной ситуацией до того, как человек успеет принять необходимые меры.

Неоценимую помощь человеку в управлении такими быстропротекающими процессами могут оказать и уже оказывают кибернетические автоматы, способные решать за время, измеряемое миллисекундами, а иногда и долями миллисекунд, логические задачи, связанные с процессами управления различными объектами.

Таким образом, по скорости своей работы кибернетические устройства на много порядков превосходят возможности человеческого организма и в ряде случаев обеспечивают более точное решение задач управления.

Без применения новейших кибернетических средств автоматизации человек зачастую оказывается беспомощным в современных системах управления, так как он в силу своих психофизиологических возможностей не может быстро и одновременно воспринимать разностороннюю информацию о контролируемых процессах, не успевает достаточно оперативно принимать соответствующие решения и своевременно и целесообразно воздействовать на объекты управления. Кроме того, человеку свойственны сомнения, колебания, неуверенность, раздражение, усталость и прочие факторы, резко сказывающиеся на точности и оперативности его управляющих воздействий. Кибернетическая машина как управляющий агрегат лишена этих недостатков.

Однако, несмотря на ряд неоспоримых преимуществ кибернетических устройств перед человеком, в самых сложных современных системах управления, включающих новейшие кибернетические автоматы, человек все же остается самым важным, а зачастую и самым надежным звеном этих систем. Это обусловлено многими решающими преимуществами человеческого организма перед современными автоматами.

Во-первых, современные кибернетические машины, как правило, работают по разработанной человеком программе, в которой заранее должны быть предусмотрены возможные внешние ситуации и соответствующие им реакции машины. При возникновении же непредвиденной ситуации подобная машина оказывается беспомощной и либо продолжает стихийное управление процессом, которое может закончиться аварией, либо, в лучшем случае, останавливает работу, прекращая дальнейшее протекание процесса.

Правда, уже разработаны различные виды самоорганизующихся систем, однако широкое практическое применение получили лишь системы простейшего типа, относительно которых заранее известно,

какие изменения необходимо внести в их структуру или программу работы, с тем чтобы при некоторых воздействиях внешней среды обеспечить их нормальное функционирование.

В этом отношении человек с его способностью к тончайшему анализу и синтезу явлений и присущими его нервной системе эффективными способами переработки информации стоит на значительно более высокой ступени, чем самые совершенные кибернетические машины. При этом значительно меньшая скорость выполнения человеком формально-логических операций компенсируется его способностью вместо кропотливой обработки всей поступающей информации использовать лишь наиболее важные данные для полноценной характеристики управляемого процесса.

Физиологические механизмы и алгоритмы процессов мышления (обработки информации) и памяти (способов хранения информации) пока можно считать почти полностью неясными. Раскрытие их позволило бы перейти к построению устройств, более полноценно моделирующих сложнейшие виды высшей нервной деятельности человека.

Другое важное преимущество живых организмов перед кибернетическими машинами заключается в значительно более гибких и совершенных устройствах восприятия внешней информации.

Для ввода информации в вычислительные машины в настоящее время широко применяется метод предварительной записи ее человеком на промежуточные носители (перфоленты, перфокарты или магнитные ленты), с которых информация далее автоматически считывается во вводных устройствах машины. При выводе информации из машин она, как правило, расшифровывается выводными устройствами и выдается человеку в виде печатного цифрового или буквенного текста.

Одна из задач кибернетической техники заключается в повышении гибкости общения машины и человека путем разработки вводных устройств, способных воспринимать информацию, закодированную различными удобными для оператора способами в виде рукописного или печатного текста, чертежей, голосовых команд и др. Желательно также расширение возможностей устройств вывода, которые должны быть приспособлены для выдачи информации в виде чертежей, объемных изображений, речевого характера (например, в машинах для автоматического устного перевода) и др.

Управляющие кибернетические машины, которые воспринимают сейчас информацию от сравнительно примитивных датчиков (пассивных, не анализирующих и не отбирающих информацию), желательно снабдить более совершенными датчиками, которые могли бы техническими средствами моделировать широкий класс ощущений: зрительных, слуховых, вибрационных, температурных и др. Они, таким образом, позволили бы кибернетической машине воспринимать, анализировать и распознавать визуальные изображения, звукосочетания и другие сложные картины внешней среды.

Решение этих задач усовершенствования органов связи машины с внешней средой и человеком требует изучения соответствующих процессов в живых организмах для использования их в качестве прототипов для технических моделей.

Третье важное достоинство человека и других живых организмов по сравнению с техническими кибернетическими системами заключается в значительно более высокой надежности

Действительно, техническое устройство, как правило, выходит из строя при отказе от работы любого блока или даже какого-либо элемента (лампы, транзистора, сопротивления, конденсатора и др.) и даже при обрыве или коротком замыкании какой-либо цепи. Пока количество элементов в устройствах измерялось сотнями и тысячами при достаточно большом сроке службы этих элементов, выход из строя того или иного элемента происходил относительно редко и срок бесперебойной работы устройства от повреждения до повреждения составлял недели, месяцы, а иногда и годы.

Однако по мере усложнения устройств, когда количество элементов в них достигает сотен тысяч и миллионов, а в дальнейшем будет составлять сотни миллионов и более, даже при высокой надежности элементов и большом сроке службы их повреждения могут происходить настолько часто, что устройство практически почти не будет работать. В живых организмах, центральная нервная система которых содержит миллиарды нейронов (нервных клеток), работоспособность системы сохраняется почти в полной мере при выходе из строя многих миллионов нейронов.

Это объясняется особой структурой нервных сетей, благодаря которой они обладают высокой надежностью, хотя элементы (нейроны), из которых они составлены, имеют относительно невысокую надежность.

Наконец, все биологические управляющие системы неоспоримо превосходят технические устройства с точки зрения миниатюрности своих элементов и экономичности их работы. Достаточно указать, что 10—15 миллиардов нейронов, которые содержатся в мозгу человека, занимают объем всего лишь около 1,5 *дм*^{3}, а общее потребление энергии мозгом не превышает десятков ватт. Каждый нейрон, как известно, может находиться либо в возбужденном, либо в заторможенном состоянии, т. е. он представляет собой элемент с двумя устойчивыми состояниями, подобный по своему действию двухпозиционному реле.

Для того чтобы нагляднее представить себе экономичность и ничтожные габариты нейронов, предположим, что мы захотели бы создать техническое устройство с количеством элементов релейного действия, соответствующим количеству нейронов, имеющихся в мозгу человека (около 14 миллиардов). Предположим, что в качестве таких технических элементов мы использовали бы триггеры на полупроводниковых приборах объемом 1 *см*^{3} каждый, потребляющие мощность по 0,1 *вт*. Тогда общий объем такого устройства при условии, что триггеры были бы упакованы вплотную один к другому, составил бы 10^4 *м*^{3}, а потребляемая мощность достигала бы 1 млн. *квт*. Значит, такое устройство имело бы размеры небоскреба (10×10 *м* в основании и высотой 100 *м*) и потребовало бы источника энергии с мощностью, равной мощности большой современной гидроэлектростанции.

Если сравнить эти величины с объемом мозга (1,5 *дм*^{3}) и потребляемой им энергией (10 *вт*), то становится очевидным, насколько далеки еще технические устройства от биологических систем по габаритам и экономичности. Правда, современные достижения микроминиатюризации позволяют реализовать значительно большие плотности упаковки элементов и снизить затрачиваемые мощности. Однако, если даже ориентироваться на самые прогрессивные разработки, обеспечивающие объемную плотность до 10^3—10^4 *элемент/см*^{3} и потребление энергии порядка 1 *мвт/элемент*, то и в этом случае

объемная плотность и экономичность биологических систем окажутся на несколько порядков более высокими.

Можно указать на удивительные механизмы ориентации некоторых живых организмов в пространстве, например пчел, голубей и рыб. Можно указать также на исключительную сложность и целесообразность всевозможных химических процессов в органической природе, на изумительно точные и гибкие системы саморегулирования температуры тела, кровяного давления, состава крови и других показателей, на экономичные способы преобразования химической энергии в механическую в мышечных тканях и др.

В результате многих миллионов лет эволюционного развития и естественного отбора в живых организмах выработались весьма тонкие и совершенные механизмы процессов обмена веществ, преобразований энергии и информации. Исследование этих механизмов для использования познаний о них при разработке и конструировании различных технических устройств и является содержанием нового направления в науке — бионики (от слова биос — жизнь).

Таким образом, бионику определяют как научное направление, занимающееся изучением биологических процессов и методов с целью применения полученных знаний для усовершенствования старых и создания новых машин и систем. Ее можно назвать также наукой о системах, характеристики которых приближаются к характеристикам живых систем.

В связи с этим следует подчеркнуть существенное различие задач бионики и биологической электроники. Последняя занимается вопросами разработки и применения электронной аппаратуры для биологических исследований именно с целью познания биологических процессов, а также для воздействия на эти процессы, а не для использования раскрытых биологических закономерностей в технике. Отличные от бионики задачи ставятся и перед медицинской электроникой, рассматривающей вопросы создания и применения электронной аппаратуры для производства медицинских анализов, для диагностических, терапевтических и хирургических целей.

Однако, несмотря на различие целей этих отраслей знания, как в бионике, так и в биологической и медицинской электронике может применяться для исследований одинаковая или весьма сходная аппаратура, что обусловливает важность самых тесных контактов между специалистами, работающими в этих областях.

Бионика в широком смысле слова, как уже говорилось, имеет дело с самыми разнообразными характеристиками живых организмов, переносимыми в технические системы, включая характеристики вещественных, энергетических и информационных процессов. Однако часто к бионике подходят с более узких кибернетических позиций, рассматривая в ней лишь вопросы, связанные с процессами управления и связи, т. е. методы и механизмы восприятия, передачи и переработки информации в живых организмах с целью использования этих методов при проектировании различных видов кибернетической аппаратуры, которая все шире внедряется в науку и народное хозяйство.

ГЛАВА ПЕРВАЯ
ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ БИОНИКИ

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ БИОНИКИ

Про бионику говорят, что она в известном смысле перебрасывает мосты от биологии к технике. Действительно, основным назначением бионики является обслуживание тех или иных запросов техники путем использования идей, заимствованных в биологии. Ряд идей биологии издавна используется в сельском хозяйстве и в медицине. Техника же столетиями развивалась практически вне связей с биологией, и вот теперь, когда общеизвестные достижения техники — космические корабли, атомные двигатели, электронные машины — казалось бы, свидетельствуют о безусловном торжестве технического прогресса, вдруг заговорили о необходимости использования в технике идей биологии. В качестве основной задачи такого использования называют заимствование принципов и методов, которые осуществлены в живых организмах.

Возникновение бионики может вызвать некоторое недоумение. Ведь люди издавна знали, что дельфины и некоторые рыбы плавают быстрее, чем корабли. И вот появились атомные подводные лодки, суда на подводных крыльях, на воздушной подушке. Скорость кораблей резко возросла, а ученые и инженеры серьезно изучают тело и кожу дельфинов для использования в кораблестроении тех механизмов, которые позволяют телу дельфина двигаться в воде с большой скоростью. Другой пример: ученым давно известно, что летучие мыши умеют хорошо ориентироваться в пространстве в условиях «слепого полета», обнаруживая препятствия и добычу на некотором расстоянии. И хотя полезно было бы иметь нечто подобное в технике, названную способность летучих мышей исследовали лишь эпизодически отдельные биологи. В последние десятилетия появились мощные локаторы, дальность действия которых заведомо превосходит все то, что могло быть достигнуто летучими мышами в ходе эволюции. И после этого ученые обратились к летучим мышам, исследуют их локаторы самым подробным образом для бионического использования.

Обобщая сказанное, можно отметить, что в биологии задолго до появления бионики было известно о многочисленных полезных механизмах связи, управления, измерения, перемещения и др. Хотя эти механизмы всегда казались интересными и полезными, практически не велось никаких работ по их внедрению в технику. В наши дни не просто пробудился интерес инженеров к биологии, а и созрели определенные предпосылки для заимствования и использования ряда идей биологии в технике. Возникла кибернетика, методы которой одинаково применимы к системам живой природы и к техническим системам. Сам по себе прогресс техники открыл огромные возможности технической реализуемости самых смелых идей. И, наконец, неуклонный прогресс техники ставит все новые, все более высокие требования перед инженерной мыслью, и, будучи не в силах в ряде случаев справиться с поставленной трудной задачей, инженер вынужден обращаться в «патентную кладовую» природы почти так же, как он привык обращаться к патентам и лицензиям научно-технических библиотек и архивов.

Чем же практически заняты ученые-бионики?

Наиболее широко ведутся работы по исследованию принципов восприятия, обработки, запоминания и использования информации. Теоретической базой этого направления бионики является кибернетика. Здесь исследуются принципы построения отдельных элементов, созданных в природе· нервных клеток (нейронов) и чувствительных окончаний нервной системы (рецепторов). Бионики пытаются дать полное описание принципа действия нейрона — этого основного структурного и функционального элемента нервной системы. Это сделать не так просто, как может показаться с первого взгляда. Исследователи рассматривают нервную систему в целом или отдельные ее части, пытаясь понять те принципы, по которым так эффективно осуществляется обработка информации в организме.

Часто получается так, что один и тот же объект исследования рассматривается с разных позиций. Так, например, одиночный нейрон рассматривается одними исследователями как прообраз логического элемента технической кибернетики. Другие исследователи видят свою цель в том, чтобы обнаружить и понять механизмы запоминания информации в нейроне. Третьи исследуют пластичность свойств нейрона для создания подобного же элемента в технике, что позволит изготавливать самоприспосабливающиеся информационные системы. Четвертых волнуют вопросы надежности работы нейрона и т. д.

Необозримо велик круг тех задач бионики, которые связаны с исследованием рецепторов. Конечной целью этих исследований является создание разнообразных датчиков информации. В одном случае датчики, подобные рецепторам, позволят резко сократить размеры воспринимающей аппаратуры: ведь рецепторы — это микроскопические клетки. (У маленького лесного муравья на каждом усике можно насчитать более двух тысяч рецепторов!) В другом случае предполагается, что бионический подход позволит создать более чувствительные элементы, чем существующие датчики систем автоматического управления. Наконец, инженеры ожидают, что раскрытие механизмов деятельности рецепторов позволит пополнить арсенал электроники и автоматики датчиками принципиально нового типа, например датчиками вкусовых или обонятельных сигналов.

Большие работы ведутся по исследованию механизмов памяти человека и животных. Многим известно, что электронные вычислительные машины имеют довольно емкие запоминающие устройства. Менее известно, что системы хранения информации, которые инженеры умеют создавать и длительное время используют в вычислительной технике, давно уже не удовлетворяют тем новым требованиям, которые к ним предъявляются в настоящее время. Каждый по собственному опыту знает, что, несмотря на некоторые «осечки», в целом память человека позволяет разместить огромные запасы различных сведений и, что самое главное, изумительно точно обращаться к той информации, которая нужна в данный момент. Здесь удивляет и привлекает биоников все: и объем хранимой информации, и скорость обращения к нужным «ячейкам» памяти (т. е. короткое время поиска), и сам принцип пополнения памяти и многое другое.

Для живых систем характерна способность к обучению. Раньше под обучением понимали только некоторые процессы вроде обучения в школе ребенка или обучения человека некоторому ремеслу. Сейчас принято смотреть на процессы обучения много шире. Во всех тех случаях, когда накапливаемый человеком или животным

опыт позволяет использовать его в последующих ситуациях, можно говорить об обучении. Элементы обучения можно заметить в ряде технических систем. Их так и называют — обучаемые системы. Но в полной мере способностью к эффективному обучению располагают пока только высшие животные и человек. В бионике большое внимание уделяется задачам обучения, так как их успешное решение позволит значительно повысить эффективность технических систем, позволит значительно упростить процессы программирования и настройки систем кибернетики.

До сих пор разговор шел об информационных и логических системах, о применимости методов бионики к решению кибернетических задач. Но как уже говорилось во введении, этим не исчерпывается содержание бионики. Помимо кибернетических задач, в бионике рассматриваются и задачи, связанные с накоплением и хранением энергии. Бионика рассматривает широкий круг задач, связанных с построением механических систем. Инженеры надеются, что знание принципов биомеханики полета птиц, плавания рыб и морских животных позволит создать принципиально новые аппараты полета и плавания. Возлагаются определенные надежды и на возможности заимствования опыта живой природы по созданию легких и прочных несущих конструкций. Наиболее смелые прогнозы предсказывают возможность заимствования «технологических процессов» живого, при которых не требуются высокие температуры, высокое давление, а конструкции можно будет получать практически любой конфигурации и не уступающие в прочности обычным заводским изделиям. Более того, уже обсуждаются гипотетические проекты самовосстановления конструкций в ходе их эксплуатации, проекты «размножения» искусственных систем.

В некоторые из этих проектов бионики можно не верить, но невозможно доказать их несостоятельность. Тем более, что казавшиеся еще вчера фантастическими проекты соединения живых организмов с электронными схемами уже сегодня успешно осуществляются в рамках построения так называемых составных биоэлектронных систем (биоуправляемые манипуляторы, микроэлектродный отвод потенциалов рецепторов и др.).

Выше речь шла о задачах, которые предполагает решить бионика. Надо сказать, что к настоящему времени уже имеется много примеров успешного решения бионических задач. Далеко не обо всех интересных решениях можно прочитать в широкой литературе. Но даже то, что опубликовано, охватывает многие направления бионических исследований. Приведем некоторые из наиболее интересных результатов, полученных в бионике, одновременно иллюстрируя по возможности области их практического использования. На схемных решениях сейчас останавливаться не будем, так как, во-первых, для ряда систем это сделать крайне трудно из-за высокой сложности, а во-вторых, схемы некоторых элементов и приборов будут рассмотрены ниже в соответствующих разделах книги.

Если судить по публикациям в журнальных статьях и сообщениям, уже создано свыше сотни разных схем нейронов (отдельных нервных клеток, из которых состоит головной мозг и вся нервная система человека и других высокоорганизованных животных). Среди схемных решений есть и электронные аналоги нервной клетки, и электрохимические, и оптические. Некоторые из них мы рассмотрим сразу после того, как ознакомимся подробнее с тем, как устроена нервная клетка, как она функционирует и как можно описать мо-

дель нейрона на языке кибернетики. Читателя, впервые читающего об этих работах биоников, возможно, удивит такое разнообразие схем нейронов. Ограничимся пока только следующим пояснением. Во-первых, разновидностей нервных клеток в центральной нервной системе довольно много. Во-вторых, обилие схем объясняется разным толкованием того, как может действовать нейрон. В-третьих, чаще всего аналоги нейронов создаются не в качестве самоцели, а для использования их в сложных системах обработки информации. В зависимости от назначения системы и ее устройства в целом могут подходить те или иные схемные решения отдельных элементов, в данном случае — нейронов.

В случае дальнейших успехов в деле отработки технологичного, дешевого, миниатюрного нейроноподобного элемента он станет основным функциональным и структурным узлом разнообразных бионических систем. Усилия конструкторов бионических устройств направлены на то, чтобы создать схемы обработки информации, подобные действующим в живых организмах. Точно так же, как у животного, все сигналы, поступающие извне, обрабатываются нервной системой и она же управляет действиями животного, действиями всех его «механизмов»: пищеварения, регулирования температуры тела, работой желез и др. — так и в искусственно создаваемых бионических системах предполагаются обработка информации и управление частями системы с помощью нейроноподобных элементов. Конструкторы бионических систем стремятся получить компактные, очень надежные, высокоэффективные, приспосабливающиеся к изменению внешних условий технические устройства.

Биологи предполагают, что информация, поступающая в организм, претерпевает первичную обработку, в ходе которой осуществляется отбор полезной информации и отбрасывается та ее часть, которая не несет полезных сведений и только способна перегружать оперативную и долговременную память животного, перегружать центральные участки нервной системы. Те звенья, в которых осуществляется отбор информативных сигналов из всего множества входных воздействий, в бионике называют отборочными фильтрами. Интересные работы по исследованию отборочного фильтра в глазу лягушки провели в Массачусетском технологическом институте (США). Результаты этих исследований заставили полностью отказаться от ранних представлений о работе глаза как проектора изображения на зрительное поле мозга. Стало ясно, что отборочный фильтр осуществляет выделение только важных для животного сигналов и только их передает мозгу. Работы физиологов в других странах полностью подтвердили существование принципа отбора информации. Более того, были открыты и другие особенности работы отборочного фильтра. Оказалось, что в нем происходит первичное опознание элементов формы изображения, что еще более сокращает информационное описание сигнала, поступающего в мозг.

На основе этих представлений учеными Иллинойского университета (США) был создан отборочный фильтр. Входное устройство фильтра представляет собой поле из 144 фотоэлементов (12×12). Поверхность каждого элемента около 1 *см*². К полю фотоэлементов прилегает поле из 144 нейроноподобных элементов («нервных ганглиев» — в терминах нейрофизиологии зрения). Отборочный фильтр в рассматриваемом случае выполнял довольно скромную роль: выдавал в качестве выходной информации только сведения о числе темных изображений, разделенных промежутками и проектируемых

одновременно на «сетчатку» фотоэлементов. Разработчики предполагают, что усовершенствованная модель отборочного фильтра сможет выдавать информацию о размерах и местоположении каждого из воспринимаемых предметов. В этом случае отборочный фильтр найдет практическое использование во входных устройствах ряда систем, ведущих автоматическое наблюдение за поверхностью суши и океанов (например, с целью метеоразведки), за самолетами и другими объектами в районе аэродромов и в других случаях.

Механизм, близкий к отборочному фильтру, открыт учеными в глазу мечехвоста. Было установлено, что глаз мечехвоста обладает уникальной способностью усиливать контраст изображения. Это позволяет много лучше рассмотреть полезный объект на фоне мешающих воздействий в том случае, когда края изображения объекта размыты. Инженеры известной американской фирмы Дженерал Электрик ведут работы по созданию электронной системы, работающей по тем же принципам. Они рассчитывают, что электронный аналог глаза мечехвоста позволит улучшить работу телевизионных трактов ряда систем, таких как системы получения и анализа снимков Луны и других планет, системы получения и анализа аэрофотоснимков земной поверхности со спутников и др.

Особенно большое внимание исследователи уделяют проблеме создания обучаемых опознающих систем, которые моделируют работу одного или нескольких органов чувств, начиная от стадии восприятия входных воздействий и кончая принятием решения о том, к какой категории, к какому классу следует отнести данное воздействие. Одной из первых и широко известных опознающих систем является перцептрон «Марк-1», разработанный в Корнельской лаборатории аэронавтики по заданию ВМФ США. Как пишут американские журналы, эта система нашла практическое использование для расшифровки аэрофотоснимков, полученных с помощью спутников. Автоматическое опознание определенного класса сюжетов аэрофотосъемки позволяет сэкономить десятки и сотни тысяч человеко-часов работы и, что самое главное, получать сообщения о появлении заданных объектов в поле зрения съемочной аппаратуры практически мгновенно, а это очень важно для разведывательной аппаратуры.

Мы вернемся к рассмотрению опознающей системы — перцептрона «Марк-1» в разделе, посвященном этим устройствам. Сейчас заметим, что, кроме этой системы, разработаны перцептроны «Марк-2», «Тобермори», ДСР, ПАПА и ряд других. Перцептрон «Марк-2» был задуман как развитие идей, заложенных в системе перцептрона «Марк-1». Главные цели разработчиков состояли в том, чтобы повысить возможности обучения и опознания, полученные в предыдущей разработке. Так, на порядок увеличивается число воспринимающих фотоэлементов и нейроноподобных элементов.

Обучаемую опознающую систему «Тобермори» разработчики окрестили «кошкой, которая бродит среди гостей, слушает их разговоры, а затем пересказывает самое интересное хозяину». В соответствии с первоначальным замыслом система должна была иметь три входных канала: зрительный, слуховой и осязательный. Кроме способности к обучению распознавать характерные ситуации внешней среды (задаваемые образы), система обладает способностью сообщать исследователю те обобщения, которые она делает в ходе обучения. Она «рассказывает» исследователю (с помощью устройства воспроизведения речи) о тех внутренних состояниях, которые у нее формируются в процессе восприятия внешней среды по трем инфор-

мационным каналам — аналогам органов чувств. Достаточно очевидна необозримость путей практического использования такого рода систем. Это и широкие исследования процессов восприятия, и моделирование механизмов мозга в норме и в патологии, и экспериментальное исследование тонких механизмов восприятия сигналов разной модальности (разной природы), и ряд других. Кроме исследовательской модели, такая система может практически использоваться в автономных подвижных аппаратах (ро́ботах), которые должны самостоятельно выполнять сложные функции в условиях изменяющихся внешних воздействий.

Система ДСР, так же как и итальянская опознающая система ПАПА, является разновидностью системы «Марк-I». Ее назначение— опознавать зрительные образы после того, как она пройдет процесс обучения — многократного показа изображений каждого класса с одновременным указанием со стороны оператора, к какому классу относится предъявляемое изображение. В описанных экспериментах системам показывались изображения букв алфавита. Но это только пробный материал. Успешная отработка схем позволяет использовать их для опознания изображений разных классов: изображений в поле микроскопа, аэрофотоснимков, образцов почвы, снимков следов элементарных частиц и др. Что касается специализированных опознающих систем, предназначенных собственно для считывания букв и цифр текста, то их к настоящему времени предложено в разных странах довольно много. Некоторые схемы приняты к промышленному выпуску. Следует только заметить, что далеко не каждая читающая машина имеет функциональный и структурный прообраз в живой природе, и в этом смысле лишь немногие из них можно назвать бионическими системами.

Американская фирма Райтеон разработала две опознающие системы с распределенной памятью. Системы предназначены для опознания сигналов, изменяющихся во времени. Примерами таких сигналов являются радиосигналы, сигналы эхолокации и шумопеленгования, звуки речи и др. Первая модель системы «Кибертрон К-100» уже используется военным ведомством США. Вторая «Кибертрон К-200» предназначена для опознания речевых сигналов и найдет широкое применение в различных областях техники. Сообщается также, что к системам типа «Кибертрон» разрабатывается специальная машина АИДЭ, выполняющая роль автономного блока памяти, куда могут записываться опорные сигналы, выполняющие роль эталонов при опознании входных воздействий.

Известны многочисленные разработки опознающих устройств, предназначенных для ввода в машину голосовых команд, для перекодирования слов и др. Такого рода работы ведут практически все фирмы и организации, специализирующиеся на выпуске быстродействующих вычислительных машин. Однако, как и в случае читающих автоматов, далеко не каждая такая система может быть названа бионической, ибо во многих случаях инженерная проработка системы ни в коей мере не связана с исследованием биологического прообраза органа слуха. Таким образом, как при постановке задачи, так и после получения результатов полученную разработку и слуховой анализатор ничто не объединяет, кроме частичного совпадения выполняемых функций. Так как здесь идет речь о работах бионического плана, то следует подчеркнуть, что имеются серьезные разработки «слушающих» машин, в которых с самого начала работ предполагался именно бионический подход. Так, например, крупная

радиотехническая фирма RCA в целях создания системы обработки речевой информации создала ряд моделей уха. Модель охватывает работу слухового тракта, начиная от ушного лабиринта и кончая нейронами, обрабатывающими информацию. Эта электронная модель воспроизводит ряд психоакустических процессов, происходящих в ухе человека. Такого рода моделирование как первый шаг на пути создания бионических аналогов органов слуха ведется во многих научных учреждениях ряда стран.

Большие практические работы ведутся по созданию бионических самоприспосабливающихся устройств, предназначенных для работы в навигационных системах. Наряду с исследованиями навигационных способностей птиц, рыб и морских зверей, которые интенсивно ведутся во многих лабораториях мира, ряд промышленных организаций уже разрабатывает технические навигационные устройства на бионических принципах. Так, американская фирма Мелпар по заданию ВВС США разрабатывает самоприспосабливающуюся систему на нейроноподобных элементах (артронах), которую предполагают установить на непилотируемых космических кораблях, совершающих посадку на других планетах. Смысл самоприспособления навигационной системы сводится к тому, чтобы достаточно быстро и гибко учитывать непредвиденные изменения условий посадки на незнакомой местности. Другие организации разрабатывают самоприспосабливающиеся системы управления полетом реактивных самолетов и космических кораблей. Система должна автоматически учитывать (без предварительного программирования всех деталей процесса полета) изменение окружающих условий. плотности воздуха, его температуры, скорости движения и др.

Упоминавшаяся уже фирма Дженерал Электрик разработала бионическое устройство «Визилог», действующее подобно глазу человека в момент посадки летательного аппарата. Предполагают, что это бионическое устройство может заменить летчика, совершающего посадку по показаниям высотомера. Гибкость устройства в сочетании с быстродействием используемой ЭВМ, ведущей расчеты высоты, позволит совершать мягкую посадку на Луну и другие планеты без участия человека.

В технической литературе имеются сообщения о том, что успешно осуществлены опыты по сочленению рецепторных клеток насекомых с электронной аппаратурой обработки сигналов, принимаемых этими рецепторами. Так, например, сообщается, что к «выходу» (аксону) центральной нервной клетки мухи удалось подключить микроэлектроды, соединенные через электронные усилители со специальными индикаторами. Входом же нейрона являются хеморецепторы мухи, расположенные на ее лапках (предполагается, что муха чувствует вкус пищи ногами). Хеморецепторы насекомого являются чувствительными элементами, реагирующими на незначительные концентрации ряда химических веществ. Рассматриваемая составная биоэлектронная схема позволила объективно регистрировать появление незначительных количеств определенного вещества. Работы этого плана преследуют вполне определенные практические цели: надежное обнаружение скоплений ядовитых газов в шахтах и других помещениях, классификацию малых количеств пахучих веществ и др.

Совершенно феноменальных результатов достиг ученый Дельгадо, который успешно осуществил обратное воздействие от электронной системы к живому организму в составной биоэлектронной си-

стеме. Вкратце суть опытов Дельгадо сводится к следующему. Подопытному животному (обезьяне, кошке, кролику) вводятся в головной мозг микроэлектроды так, чтобы они попали в центры, управляющие поведением животного.

Помимо прямого электрического воздействия на выведенные из черепа концы микроэлектродов, имеется возможность посылать такого рода воздействия по радиоканалу. Таким образом, подопытное животное может находиться далеко от экспериментатора. Оно ничем не стеснено в своих действиях. К небольшой коробочке, закрепленной на голове, животное со временем привыкает. В коробочку вмонтирован транзисторный радиоприемник, который принимает радиосигналы управления, посылаемые передатчиком экспериментатора, и в соответствии с простым кодом управления направляет эти сигналы на те или иные микроэлектроды.

Были найдены центры, ответственные за агрессивные, враждебные действия животного, и центры, определяющие возникновение положительных эмоций. Посылая на микроэлектроды, введенные в центры агрессивных состояний, электрические импульсы, вызывают раздражение этих центров, и животное под воздействием такого рода сигналов проявляет все признаки ярости. Оно ищет объект для агрессии. Чаще всего животное проявляет вражду не случайным образом, а целенаправленно, против тех, кто чем-либо был неприятен ему ранее. Так, например, молодые обезьяны под воздействием сигналов, вызывающих у них агрессию, обрушивают свой гнев на соперниц, которые ранее обижали их. Однако стоит только после этого направить сигналы на микроэлектроды, вживленные в центры положительных эмоций, как разъяренное животное почти мгновенно изменяет поведение на прямо противоположное, начинает проявлять признаки добродушия и довольства собой и окружающими. Дельгадо отснял ряд фильмов, в которых имеются неправдоподобно выглядящие кадры. Например, обезьяньи стаи, спасаясь от гнева разъяренного вожака (этот гнев вызывает экспериментатор, раздражая соответствующие центры в головном мозгу вожака с помощью вживленных электродов), мечутся по клетке, случайно хватаясь за прутья клетки, палки и другие предметы. Хватаясь вначале случайно за рукоятку управления положительными эмоциями вожака, обезьянки со временем усваивают причинно-следственную связь между своим действием — нажать рукоятку дистанционного управления — и мгновенным изменением поведения вожака в лучшую сторону. После этого вынужденного обучения происходят такого рода сцены. Экспериментатор посылает сигналы, вызывающие вражду вожака по отношению к одной из обезьянок. Та сразу же бросается к рукоятке управления положительными эмоциями вожака и, нажав рукоятку, мгновенно «усмиряет» агрессора.

Не менее впечатляюще выглядят кадры, когда на арену к разъяренному быку вместо тореадора выходит доктор Дельгадо, сжимающий в руках не плащ и не меч, а кнопочник управления, вмонтированный в транзисторный радиопередатчик. На голове быка закреплена маленькая коробочка радиоприемника, от которой отходят провода, присоединенные к вживленным в кору мозга микроэлектродам. Бык бросается на Дельгадо, и когда расстояние становится опасно малым, ученый нажимает кнопку управления животным. Происходит мгновенная смена ситуации от опасной к комичной: боевой бык корриды начинает вилять хвостом и готов лизнуть руку своего недавнего противника

Эта небольшая пока еще серия экспериментов, проведенная, кроме Дельгадо, рядом других ученых на различных животных, убедительно показала принципиальную возможность построения составной биоэлектрической системы с эффективно действующими дистанционными связями. Пока работа ведется с привязкой к легко обнаруживаемым центрам управления эмоциями. Существует много предположений о путях продолжения и углубления этих работ, но их обсуждение даже в среде специалистов звучит поистине фантастически. Будем считать, что в нашу задачу не входит обсуждение принципиально возможных, но пока экспериментально не подтвержденных перспектив бионики. Читателю, желающему познакомиться со смелыми прогнозами в этой области бионики, нетрудно взять доступную литературу, посвященную этим вопросам.

«ПАТЕНТЫ» ЖИВОЙ ПРИРОДЫ

В литературе часто упоминается о том, как, приобретая патент или лицензию на то или иное изобретение или открытие, владелец получает возможность, не тратя усилий на поиски сложных технических решений, легко изготовить то или иное устройство, прибор, машину и др. Очень часто идут на большие расходы по приобретению патента, так как они все же окупаются с лихвой. Сейчас многие инженеры, встречаясь с неразрешимой технической задачей, обращаются в патентные хранилища в надежде найти уже сделанное изобретение, позволяющее решить возникшую задачу. Примерно так же можно представить себе недалекое будущее, когда в связи с запросами техники инженеры будут просматривать специальные пособия справочного характера, в которых можно будет найти точное описание имеющихся решений, полученных живой природой в ходе эволюции того или иного вида живых организмов. Пока что таких «патентных» указателей нет, купить их не у кого, и исследователям еще предстоят годы упорного труда, прежде чем многое из того, что достигнуто в природе, станет известно с точностью до инженерного описания принципа действия, способа, метода и т. д. Таким образом, заголовок этого раздела надо понимать не в прямом, а в переносном смысле.

Даже сейчас, когда нам известно довольно много об изобретательности живой природы, хотя и очень мало о существе этих «изобретений», можно предположить, что перечень «патентов» живой природы будет очень и очень велик. Не претендуя на правильность выбранного принципа систематики «патентов» и уже ни в коем случае на полноту перечня, укажем некоторые из механизмов и способов, которые интересны с точки зрения бионики.

Перечень «патентов» живой природы начнем с тех устройств и способов, которыми располагают насекомые — самый многочисленный и многообразный класс животных. В этот класс входит около миллиона видов насекомых (ежегодно открывают около тысячи новых видов, ранее неизвестных энтомологии — науке о насекомых, изучающей их строение, жизнедеятельность и значение в сельском хозяйстве и здравоохранении). Сам по себе факт большого числа ежегодных открытий новых видов говорит о том, что интересующие бионику патенты еще ждут своей регистрации хотя бы уже потому, что их хозяева — насекомые определенного вида — еще не открыты и не изучены наукой.

Установлено совершенно точно — по отпечаткам в угольных пластах — о существовании насекомых уже в каменноугольный период.

Таким образом, насекомые ведут борьбу за существование на протяжении сотен миллионов лет. В результате естественного отбора выживали только наиболее приспособленные к жизни организмы, а в силу многообразия внешних условий должны были стать многообразными механизмы поиска и добычи пищи, способы защиты от врагов и общения с соседями по ареалу (области распространения).

Говорят, что если пересчитать ступеньки эволюционной лестницы, то насекомые стоят много выше, чем животные. Существует даже мнение, что только жесткий хитиновый покров насекомых — наружный скелет — послужил тормозом в их развитии. Если бы не это препятствие, то они в ходе эволюции достигли бы еще более высокой ступени развития. Лишь из-за хитинового панциря насекомые на протяжении миллионов лет остаются на том уровне, которого они достигли в первые же десятки миллионов лет своего существования. Если даже это и так, то последующие сотни миллионов лет благополучного существования на нашей планете объективно свидетельствуют о том, что насекомые прекрасно приспособились ко всем превратностям судьбы. Исследования последних десятилетий подтверждают наличие у насекомых большого числа интереснейших механизмов приспособления к внешней среде. Многие из них интересны с точки зрения бионики. Начнем с тех механизмов, которые имеют кибернетическую трактовку.

У большинства насекомых важнейшим органом чувств является зрение. Многим известно, что в отличие от глаз высших животных и человека глаз насекомого состоит из большого числа крошечных глазков — фасеток, или омматидиев. Но часто думают, что число таких фасеток невелико и поэтому зрение насекомых много хуже, чем у животных, сетчатка глаза которых состоит из сотен тысяч и даже миллионов фоторецепторов. Но на самом деле зрение насекомых великолепно. Количественные оценки показывают следующее: у всем известной стрекозы каждый глаз состоит из 20—30 тысяч фасеток, а есть насекомые, у которых число фасеток достигает десятков миллионов.

Если давать оценки качества зрения насекомых, то следует вспомнить, что стрекозы — хищницы. Они в воздухе обнаруживают малые цели (мух, мошек) и, пикируя на добычу, без промаха хватают ее своими челюстями. Все это происходит на крутых виражах при очень больших скоростях. Известны некоторые виды стрекоз, которые могут развить скорость до 150 *км/ч*. Или возьмем такой факт. Пчелиный волк, или оса-наездник, настолько хорошо запоминает предметы, окружающие ее гнездо, что отыскивает и опускается на знакомую площадку, устланную камнями, шишками, ветками, и в том случае, если эту площадку или устилающие ее предметы перенести в сторону. И наоборот, если изменить расположение предметов на площадке или заменить большую часть их другими, оса-наездник уже не сможет найти свою норку.

Вместе с тем фасеточные глаза насекомых не дают достаточно четкого изображения предметов сложной формы. Они отражают предметы в виде мозаики, напоминающей газетную фотографию. Так чем же примечательны фасеточные глаза? Оказывается, что они идеально приспособлены для обнаружения и опознания движущихся предметов. Давно замечено, что хищные насекомые бросаются только на движущуюся добычу, и здесь их действия доказывают наличие очень хорошего зрения. Именно это обстоятельство и было использовано в бионических разработках, где, имея в качестве

прообраза фасеточный глаз пчелы или стрекозы, были сконструированы принципиально новые приборы определения скорости перемещения самолета (при посадке), автомобиля и других скоростных объектов.

Фасеточные глаза насекомых (пчел, муравьев) позволяют им использовать явление поляризации солнечных лучей для ориентации в пространстве. В опытах с пчелами Фришем еще в 1948 г. было установлено, что поляризованный свет позволяет насекомым, не видя солнца (из-за облаков, специального экрана и др.), определять свой путь. Вектор поляризации однозначно указывает насекомому положение светила на небе, а в нормальных условиях ориентация пчел осуществляется именно по солнцу. Отсюда следуют по крайней мере две бионические идеи. во-первых, возможность изготовления микроминиатюрных поляроидов для физического анализа поляризации лучей: во-вторых, принципиальная возможность создания средств навигации по положению солнца путем анализа поляризованных лучей.

Слуховое восприятие у многих насекомых отсутствует. У отдельных видов практически невозможно отделить слуховое восприятие от тактильного (ощущения прикосновения). Но ряд насекомых имеет явно выраженный слух. Диапазон слухового восприятия может выходить за рамки нашего слуха как в сторону инфразвуковых, так и в сторону ультразвуковых колебаний. Так, например, некоторые виды ночных бабочек (совки, пяденицы) воспринимают ультразвуковые посылки летучих мышей и реагируют на них как на сигнал опасности: одни из них ускоряют полет, другие стремительно падают на землю. Размеры некоторых ночных бабочек чрезвычайно малы, менее одного сантиметра, а значит, малы и размеры их слухового аппарата обнаружения посылок ультразвукового локатора.

Биологи провели много исследований слуха насекомых и накопили обширный материал по анатомии органов слуха ряда насекомых, по акустическому поведению. Проведены некоторые биофизические исследования. Однако этого все еще недостаточно для того, чтобы считать «запатентованными» основные механизмы слуха насекомых. Пока нельзя считать даже точно установленным, где располагаются органы слуха у каждого из насекомых. Известно только, что располагаются они в самых неожиданных местах. У саранчи — на брюшке, у бабочек — на груди, а у кузнечиков — даже на ногах.

Далеко не каждое насекомое, обладающее слухом, может так эффективно обнаруживать локационные посылки, как ночные бабочки. Но даже в относительно простых устройствах органа слуха насекомых есть патентоспособные идеи, например, по реализации принципов, обеспечивающих колоссальную чувствительность Измеряя пороги чувствительности слуха насекомых, исследователи пришли к наглядному и поразительному результату. Ряд слышащих насекомых реагируют на звуковые колебания, амплитуда которых соизмерима с диаметром атома водорода.

Они установили многочисленные факты, из которых следует, что в отдельных случаях издаваемые «поющими» насекомыми звуки несут сигнальную нагрузку, будучи направлены на продолжение рода, на сохранение вида и др. Анализ записей «пения» показал, что одно и то же насекомое поет в разных случаях по-разному. Для некоторых видов удалось установить нечто вроде целой системы сигналов.

Далеко не все насекомые руководствуются запахом в поисках дороги, пищи, особи другого пола, но те из них, которые используют запахи, делают это довольно хорошо. Обоняние, так же как и вкус, относится к химической чувствительности. Этот вид сигнального общения насекомых со средой и сородичами все еще полон загадок, но именно он все больше привлекает биоников, ибо химическая сигнализация крайне слабо представлена в автоматике и технике связи, а исследования последних лет показывают, что это является досадным упущением техники.

Органы химического чувства (хеморецепторы) располагаются у насекомых на антеннах (усиках) и на лапках (иногда на пальпах — специальных выростах головы). Обонятельная и вкусовая чувствительность не только у разных видов, но и у каждого из них меняется в зависимости от внешних условий, физиологического состояния насекомого, возраста и т. д. У сытых особей чувствительность, как правило, снижается, у голодных — резко обостряется.

Очень легко установить расположение обонятельных рецепторов на антеннах бабочки или муравья: достаточно удалить эти антенны, и насекомое перестает реагировать на запахи. Гораздо труднее понять основные механизмы химической деятельности. Внешние наблюдения, проводимые над насекомыми, однозначно показывают, насколько велика биологическая роль обонятельных рецепторов в жизни таких насекомых, как пчелы, муравьи. Установлено, что, используя обонятельные ощущения (иногда в сочетании с другими, например с осязательными), как пчелы, так и муравьи великолепно различают пахучие смеси в разнообразных сочетаниях. Используя, по-видимому, широкий диапазон, большую гамму запаховых представлений, они обладают великолепной памятью на запахи (запоминают запаховые ориентиры на земле и в воздухе, помнят специфические запахи особей своего гнезда).

Разнообразны способы использования запахов насекомыми. Самки наездников, откладывая яйцо внутрь других насекомых с целью обеспечения своего потомства пищей, одновременно метят поражаемую личинку отпугивающим запахом, чтобы не использовать ее же для этой цели повторно: ведь внешне личинка, пораженная наездником, еще длительное время ничем не отличается от других личинок.

У многих видов насекомых запах самки привлекает самца на больших расстояниях. Для разных видов исследователи называют различные расстояния. Рекордными, по-видимому, можно считать расстояния от 5 до 15 *км*. Если самец или самка летят навстречу друг другу, то проблема сближения такой пары очень похожа на техническую проблему сближения автономно управляемых объектов в космосе. Здесь интересно все: и система обработки информации, и механизмы управления и самонаведения. Если даже считать, что запах имеет сигнальное значение только в воздушной или в водной среде и не может использоваться в космосе (хотя пока нет достаточных оснований отрицать такую возможность), то и для первых двух сред такие большие расстояния (до десятка километров) позволяют назвать большое число технических приложений. А ведь обнаружение запаха на больших расстояниях не такой уж редкий феномен в мире насекомых. Ряд исследований показывает, что маленькая хищница (божья коровка) узнает по запаху о колонии тлей, которыми она питается, на расстоянии свыше километра. Называют

даже случаи, когда «дымовые жуки», которых привлекают пожарища, прилетают на запах дыма с расстояний около 80 *км*.

Эффективное использование запахов в качестве сигналов все больше привлекает внимание инженеров. Но много неясного в химии и физике запахов затрудняет проведение исследований. Возможно, что бионика позволит внести многое не только в создание систем дистанционной химической сигнализации, но и в собственно теорию запахов. Правда, проблема обоняния считается очень трудной и в общей биологии. Академик И. П. Павлов называл проблему запахов одной из наиболее сложных в физиологии.

Выше уже называлось количество обонятельных рецепторов на антеннах муравья. Добавим, что у падальной мухи на усиках насчитывается более 3 500 хеморецепторов, у оводов — более 6 000, у рабочей пчелы — около 12 000. Если вспомнить о размерах антенники-усика, на которой расположены и рецепторные клетки, и нервные сети для проведения и обработки запаховой информации, то легко представить себе те трудности, которые ждут исследователя при попытке разобраться, как устроен этот сигнальный аппарат насекомых.

Трудности усугубляются тем, что, приступая к таким исследованиям, ученый сегодня еще не знает, что такое запах (существует более 30 теорий, объясняющих запах как перенос пахучих частиц, как электромагнитное излучение в особом диапазоне частот и др.). Ученый не знает, сколько существует запахов, так как в отличие от трехцветной теории классификации цвета не существует сколько-нибудь удовлетворительной системы для описания или классификации запахов. Одни ученые называют четыре первичных запаха, из смешивания которых получаются все остальные, другие говорят о шести, о девяти первичных запахах и т. п.

Мы так подробно остановились на хеморецепции, потому что исследования последних лет показывают, что этот информационный канал инженеры незаслуженно забыли. По-видимому, не случайно он широко используется в животном мире. Буквально неограниченны возможности практического использования обонятельной информации, но только в том случае, если появится возможность автоматизировать процессы восприятия и обработки запаховой информации. Уже сейчас известно, что по запаху тела можно очень точно определять ряд скрытых заболеваний человека или животного, и можно надеяться, что объективная обработка запаховой информации позволит очень тонко дифференцировать ряд заболеваний. Трудно переоценить этот перспективный вид медицинской диагностики, не связанный с необходимостью длительных процедур, обследований, анализов, снимков, измерений и т. д. Хеморецепция привлекает всеобщее внимание и потому, что в связи с колоссальными успехами химии приходится по-иному смотреть на автоматику управления технологическими процессами, на проведение экспресс-анализа продукции и сырья, на контроль за процессами взаимодействия химических веществ. Грубо говоря, лакмусовой бумажкой теперь уже не обойдешься, а ассортимент существующих электронных датчиков для снятия информации о процессах химизма очень мал, параметры этих датчиков давно уже не удовлетворяют требованиям современной и перспективной химической промышленности.

В экологии животных (науке о взаимоотношениях организма и среды) существует понятие терморецепции. Насекомые чрезвычайно чувствительны к колебаниям температуры. Многие виды отчетливо

реагируют на рассеянное тепло. Клещи, комары и другие насекомые-кровососы по тепловому излучению успешно разыскивают свою жертву. Здесь также есть место для проведения бионических исследований с целью выявления «патентов» на сверхминиатюрные чувствительные датчики температур и «патентов» на системы теплового самонаведения.

Ряд насекомых воспринимает изменения влажности воздуха при помощи особых гигрорецепторов, обычно расположенных на антеннах-усиках. В одних случаях гигрорецепторы очень точно фиксируют величину насыщения воздуха влагой, в других — измеряют разность величины влажности (реагируют на градиент относительной влажности). Жуки-плавунцы во время перелетов могут по влажности воздуха находить водоем. Эти механизмы также небезынтересны для бионики.

Высказаны предположения, что некоторые виды бабочек обладают механизмами электромагнитной ориентации и что использование электрических и электромагнитных явлений с целью ориентации распространено в животном мире гораздо шире, чем это считали до последнего времени.

Практически все процессы и явления в живой природе строго синхронизированы во времени. Это многократно проверенные факты. Насекомые, как и другие животные, обладают загадочным механизмом биологических часов. Существует много предположений о том, как могут быть устроены такие «часы», но хотя факт их обязательного существования никто отрицать не может, принцип действия биологических часов все еще неизвестен. Здесь могут быть открытия, имеющие огромное значение для сложных технических систем обработки информации.

Выше уже говорилось о механизмах обучения насекомых и о наличии у них оперативной (кратковременной) и долговременной памяти. Назовем эти механизмы еще раз, потому что они имеют чрезвычайно большое значение для дальнейшего развития бионики и кибернетики.

Насекомые располагают рядом способностей, которые не имеют пока никаких научных объяснений. Например, английские ученые, используя арсенал современной физики (меченые атомы, наблюдение в ультрафиолетовых лучах и т. д.), строго доказали, что бабочка вида номофилла-ноктуэлла сразу после рождения в Северной Африке отправляется в далекое и трудное путешествие — в Англию. Из яичек, отложенных на лугах Англии, выводятся бабочки, которые тут же летят в Северную Африку, а прилетев туда, откладывают яички и погибают. Их потомство сразу после появления на свет отправляется в обратный путь. И так из века в век. Представьте себе мысленно все мешающие факторы такого путешествия из Северной Африки в Англию или обратно и вы хорошо почувствуете не только трудности преодоления такого огромного расстояния, но и трудности поиска дороги. Навигационные способности этих бабочек составляют одну из тайн жизни насекомых.

Другой пример: наездник-эфиальт — великан в мире насекомых. Его длина—4 *см*, а сзади брюшка тянется «шпага» (яйцеклад) иногда в 2—3 раза длиннее тела. Быстро бегая по стволу дерева, наездник слегка касается его поверхности своими длинными усиками. И если на глубине до 4 *см* в древесине имеется подходящая личинка, наездник установит это не хуже, чем это могли бы сделать люди, используя специальные рентгеновские или ультразвуковые аппараты

дефектоскопии. Как это делает наездник, какой информационный канал он при этом использует, что позволяет ему совершенно точно определить вид личинки и ее положение под плотным слоем древесины — на эти вопросы пока нет ответа.

Далее начинаются новые чудеса, скорее из области механики, чем кибернетики, хотя, быть может, и не без участия кибернетических механизмов управления. Дело в том, что, обнаружив добычу, наездник начинает мягким и длинным (до 8—10 *см*) яйцекладом бурить ствол дерева. Толщина яйцеклада не больше конского волоска. Но проходит 5—10 *мин*, и личинка, залегающая под слоем прочной древесины толщиной до 4 *см*, поражена «шпагой» (яйцекладом). Яйцеклад полый внутри, и по трубке яйцеклада в пораженную личину спускается яичко, из которого через некоторое время выведется новый наездник, обеспеченный родителями пищей на весь период роста и развития (кстати, не совсем ясно, как он выбирается на свободу). А наездник-родительница бегает по стволу и ищет новую жертву.

Представляется загадочным и способ обнаружения червя в земле осой-аммофилой. Как пишет французский исследователь насекомых Ж. А. Фабр, почва может быть голой и покрытой травой, мягкой или каменистой, плотной или рыхлой — это не имеет значения для аммофилы. В отдельных случаях она не может сама разрыть лапами землю и добраться до червя, но если исследователь начнет раскапывать землю в том месте, где пыталась ее копать лапками оса, он обязательно найдет червя. Исследователи склонны предполагать, что обоняние здесь не может помочь: червь (в нашем представлении) ничем не пахнет. Кроме того, его экранирует толстый слой земли, иногда покрытый гнилыми листьями, издающими сильный аромат, заглушающий слабые запахи, если предположить, что они все же есть (эти аргументы не являются сильными, если у насекомых существует тонкая селекция запахов). Червь, являясь ночным насекомым, лежит в момент поиска совершенно неподвижно, что исключает обнаружение по звуку. Так и остается пока не выясненным принцип пассивной или активной локации червя через слой земли.

Кроме перечисленных выше, можно было приводить еще и еще примеры загадочных или необъяснимых явлений из жизни насекомых. Можно было бы рассказать о языке пчел, с помощью которого они передают друг другу сведения о месте расположения корма. На другом языке обмениваются подобной информацией муравьи. Очень много интересных явлений и механизмов можно привести и из других сфер деятельности насекомых. Сейчас известно, что многие из них — искусные консерваторы пищи Они могут заготавливать для корма своим личинкам парализованные, но остающиеся живыми тушки жуков, гусениц, червей. Искусство пчел строить свои ульи стало хрестоматийным. Менее известно умение пчелы-листореза строить свои ячейки из листьев, очень точно вырезая из них выкройки (стенки, донышко, крышку), причем не кое-как, а правильной формы, соответствующей назначению. Есть и другие пчелы, которых называют каменщицами. Они искусно строят свои гнезда из смеси песка и земли, армированной мелкими камешками, замешивая раствор на собственной слюне Быть может, это и не заинтересует строителя нашего времени, но хорошо иллюстрирует многогранную деятельность насекомых. Ведь данный пример нам хорошо понятен потому, что мы уже умеем делать нечто подобное, но согласитесь,

что не знай мы о принципах армирования цементного раствора, о способах замешивания цементного раствора, деятельность пчелы-каменщика могла бы сослужить большую службу. Сейчас не будем строить предположения о том, что, быть может, кто-то из наших далеких предков в силу своей наблюдательности и смекалки подметил действия пчелы-каменщика и последовал хорошему примеру (некоторые утверждают, что почти все из того, что изобретено человеком, в той или иной степени заимствовано у живой природы). Важнее другое — в живой природе еще очень много интересного, пока не используемого в нашей жизни, и умение увидеть это интересное, понять его и заимствовать в своих делах — это и составляет основную задачу бионики.

Мы начали перечень «патентоспособных» идей живой природы с рассказа о некоторых возможностях насекомых. Во-первых, это старейшие жители нашей планеты. Во-вторых, и это очень важно для экспериментов в области бионики, насекомых так много, а размножаются они так быстро, что это неисчерпаемый экспериментальный материал для исследований, который стоит к тому же относительно дешево (и в смысле приобретения, и при содержании). В-третьих, морфология насекомых проще, чем высших животных, хотя и не стоит заблуждаться на этот счет: вспомним о количестве единичных рецепторов в одном только усике пчелы или муравья, а так как каждый из рецепторов — это сам по себе довольно сложный прибор, в целом один только усик насекомого представляет собой сложную систему. Наконец, в-четвертых, даже из приведенного краткого перечня видно, как разнообразен и богат идеями бионического содержания необъятный мир насекомых. Мы только раз упомянули стрекозу, а ведь их на земном шаре не менее пяти тысяч видов, и у каждого вида свои особенности. У одного вида скоростных стрекоз можно в явном виде наглядно проследить механизм гашения вредных вибраций крыльев, имеющих для этого специальные утолщения кромки крыла, у другого удобнее проверить конструкцию жвал, у третьих — двойное зрение (одно для поиска целей на фоне неба, другое для поиска жертвы на фоне земли) и т. д. Мы упомянули муравьев. Их известно около 20 тысяч видов, и они чрезвычайно разнообразны. Один вид может явиться объектом бионических исследований механизмов ориентации, другой — языка общения, третий — систем кондиционирования воздуха во внутренних помещениях муравейника и т. п.

Итак, ограничив бионические исследования только насекомыми, уже можно выявить очень много полезных для техники механизмов и способов приема, передачи, преобразования, запоминания и использования информации, способов преобразования энергии, принципов конструирования летательных аппаратов, аппаратов для перемещения в воде, на земле и под землей.

Не менее интересны подобные механизмы у моллюсков, ракообразных, рыб, земноводных, птиц и, наконец, млекопитающих. Некоторые из «патентов», принадлежащих животным разных классов и типов, будут рассмотрены в последующих главах.

Венцом эволюции всего живого на Земле является человек. Надо сказать, что человек тоже стал объектом бионических исследований. В бионике очень серьезное внимание уделяется центральной нервной системе, структурам головного мозга человека, особенностям механизмов психики, работе анализаторов человека (зрительного, слухового и др.).

В некотором смысле человек удобен для проведения бионических исследований: часто другое существо молчит, заставить его что-то сообщить экспериментатору, например путем выработки условных рефлексов, очень трудно, а подопытный человек охотно рассказывает свои впечатления, ход мысли и др. Именно благодаря этому нейрохирургу Пенфильду удалось найти многие характерные поля коры головного мозга. При операциях на черепе в мозг вводились электроды, с помощью которых можно было производить электрическую стимуляцию соответствующих точек мозга (сама процедура ввода электродов в ткань мозга безболезненна). Оперируемый человек сообщал экспериментатору, что он чувствует при раздражении тех или иных точек: удовольствие, жажду, гнев. При раздражении некоторых участков мозга человек вспоминает давние события. Однако границы экспериментов на человеке ограничены. Поэтому многое мы еще не можем проделать на натуре и заменяем — частично или полностью — моделированием.

Бионическое исследование человека тесно смыкается с исследованиями, которые издавна проводятся в рамках других наук — психологии, физиологии, инженерной психологии. Эти науки обогащают бионику, а последняя в свою очередь приносит некоторую пользу всем наукам о человеке, открывая все новые и новые пути и возможности моделирования.

Среди многочисленных задач бионического исследования человека большое практическое значение имеет актуальная ныне область исследований кибернетической системы «человек — машина». Это пока еще не реализация идей Дельгадо. Такую систему нельзя назвать биоэлектронной составной системой, но в ходе работы человека в системе «человек — машина» допустимо рассматривать человека-оператора как самостоятельное звено системы.

Решение основных задач синтеза систем «человек — машина» идет двумя путями. На первом из них исследователь стремится максимально согласовать характеристики машины с характеристиками человека-оператора с тем, чтобы создать оптимальные условия работы человека. Это относится к информационным связям человека с машиной, когда потоки информации стремятся вывести из машины на приборы отображения таким образом, чтобы равномерно загрузить анализаторы человека с учетом их пропускной способности, утомляемости и других факторов. Это же относится и к моторной деятельности человека, когда все рукоятки, кнопки, тумблеры управления стремятся расположить так, чтобы согласовать антропометрические характеристики человека с конструкцией пульта, с учетом зон досягаемости, частоты использования и т. д.

Другой путь состоит в тщательном исследовании человека с целью выявления тех механизмов, которые можно использовать в работе и которые ранее были неизвестны или не принимались во внимание. Так, космонавтам и летчикам предполагают подключить еще один канал ввода информации по тактильному анализатору. Этот канал можно эффективно использовать для ввода сигналов аварийного характера, а возможно и более широкое его использование, так как механизмы тактильных ощущений по некоторым параметрам не уступают слуху и зрению. Но, пожалуй, наибольшее число исследований человека относится к анализу и моделированию работы его основных анализаторов — зрительного и слухового.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ БИОНИКИ

Рассмотрим некоторые особенности постановки бионической работы в общем виде, вне зависимости от конкретной решаемой задачи. Начинается работа с четкой постановки задачи. Как правило, на этом этапе привлекается математика, которая позволяет строго формулировать рассматриваемую задачу. После этого изыскивается решение в «патентной кладовой» природы. Если способ решения этой задачи существует в живой природе и уже зафиксирован в специальной литературе, то собственно биологические исследования не нужны. Пока чаще всего полного ответа на поставленные вопросы биология не дает. Это предполагает проведение специальных биологических исследований, что в ряде случаев сопряжено со значительными трудностями. Когда становится ясно, как решила эту задачу живая природа, переходят к реализации найденных идей методами современной техники.

Таким образом, работы в области бионики предполагают не узкую специализацию, а наоборот, наличие глубокой эрудиции в широком диапазоне вопросов от математики, физики и биологии до современной радиоэлектронной техники. Зачастую такой широкий охват разнородных дисциплин не под силу одному специалисту, и на разных стадиях работы в нее включаются специалисты различных профилей. Один специализируется в области теоретических исследований математического плана, другой — в области биологии или биофизики, третий — в области технических реализаций. Но надо в какой-то степени знать все три области, чтобы понимать, что требуется при работе в одной из них.

Может показаться, что нет нужды говорить о роли математики для бионики: ведь каждому известно, что в наше время все науки стремятся к использованию математических методов. Но на самом деле эти вопросы не так уж очевидны. Во-первых, не каждому человеку, даже интересующемуся бионикой, нравится математика сама по себе. Значит, возникают вполне естественные опасения, не является ли это препятствием для обучения и работы в области бионики. Во-вторых, современная математика настолько необъятна и многообразна, что не ясно, в каком объеме следует ее знать для занятий бионикой. Наконец, в-третьих, может возникнуть вопрос о том, с чего начать и какие разделы математики являются основными для данной отрасли. На эти три вопроса постараемся далее ответить.

Пока еще нет учебного пособия по математике для специалистов, работающих в области бионики, да и требуемый математический аппарат полностью не разработан. Можно лишь назвать те разделы математики, которые обязательно будут туда входить.

Один из первых разделов математики, написанной для биоников, должен быть посвящен теории множеств.

По современным математическим представлениям «множество» является очень широким, всеохватывающим понятием. Его значение для математики так велико, что теорию множеств считают одним из основных разделов, образующих фундамент математики. Но помимо обоснований основ математики, теория множеств имеет огромное значение как аппарат, обслуживающий ряд других дисциплин, в частности таких, как кибернетика, биология, бионика. Обсуждению потенциальных возможностей теории множеств посвящено много исследований как в математике, так и в философии. Это связано

с тем, что фактически мы на каждом шагу сталкиваемся с понятием множества и часто пользуемся им. только иногда не слишком строго. Действительно, в математике множеством называют совокупность объектов. Сами объекты могут быть любой природы: вещи, явления, идеи, числа, буквы и т. д. Так, можно говорить о множестве насекомых, о множестве видов, о множестве молекул, о множестве движений, о множестве четных чисел и др.

В математике вводятся специальные понятия конечное и бесконечное множество, подмножество, пустое множество и ряд других. Кроме того, определяются те операции, которые можно осуществлять над множествами соединение множеств (операция, близкая к суммированию, но не тождественная ему), пересечение множеств (операция нахождения того общего, что есть у рассматриваемых множеств), дополнение множества (операция, близкая к вычитанию). Используя специальные символы, можно обозначить ими как элементы множества, так и сами множества и операции над ними Тогда вместо длинной записи на обычном языке, допускающем использование синонимов, разных грамматических оборотов и даже разного понимания правильно построенной фразы, можно целый ряд задач записать компактно и в такой форме, что каждый, читающий формулировку задачи, будет понимать ее только в одном, предписанном смысле.

Еще более важно то, что оказывается возможным решение задачи без обращения к тому, что собой представляют объекты, входящие в рассматриваемые множества. Правда, это будет решение задачи в общем виде, но для многих случаев именно это и хорошо; решив одну задачу, мы получаем возможность использовать это же правило для решения многих задач, подобных первой. Так, мы естественно подходим к понятию алгоритма, т. е. правила для решения класса задач. Для иллюстрации сказанного приведем ряд определений теории множеств в том виде, как они излагаются в обычном курсе математики.

Под множеством понимается совокупность объектов (любой природы), на которую распространяется свойство состоять из определенного числа элементов. Множества, состоящие из конечного числа элементов, называют конечными множествами. К числу конечных множеств причисляют и пустое множество, т. е. множество, не содержащее ни одного элемента. Число элементов пустого множества есть нуль. Существуют совокупности, состоящие из бесконечного ряда элементов (например, множество всех натуральных чисел и др.). Такие совокупности и называют бесконечными множествами.

Множества обычно обозначают большими буквами, а их элементы — малыми. Если A обозначает некоторое множество, то запись $x \in A$ означает, что x является элементом множества A (принадлежит множеству A, содержится в A), если же x не принадлежит множеству A, то пишут $x \in A$. Каждый элемент либо принадлежит, либо не принадлежит данному множеству.

Если каждый элемент множества A есть вместе с тем элемент множества B, то множество A называют частью или подмножеством множества B. В этом случае можно записать:

$$A \subseteq B \text{ или } B \supseteq A.$$

Если A есть подмножество множества B, причем $A \neq B$, то пишут:

$$A \subset B \text{ или } B \supset A.$$

Знаки $\subseteq$, $\subset$ называют знаками включения одного множества в другое.

Всякое множество A есть подмножество самого себя. Пустое множество есть часть всякого множества.

Соединение. Множество всех таких элементов, которые содержатся хотя бы в одном из данных множеств, называют соединением данных множеств.

Соединение множеств обозначается знаком $\bigcup$ (иногда знаком сложения $+$) например, $A \bigcup B$ есть соединение множеств A и B.

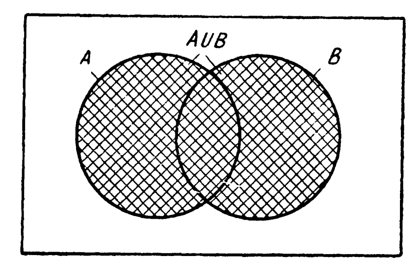


Рис. 1. Операция соединения двух множеств.

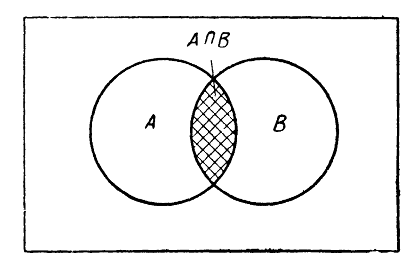


Рис. 2. Операция пересечения двух множеств.

Операцию соединения можно изобразить геометрически с помощью так называемых кругов (диаграмм) Эйлера так, как это показано на рис. 1.

Пересечение. Множество всех таких элементов, которые содержатся в каждом из данных множеств, называется пересечением данных множеств, или общей частью.

Пересечение обозначается знаком $\bigcap$. Геометрически пересечение иллюстрирует рис. 2.

Разность. Множество всех таких элементов множества A, которые не содержатся в множестве B, называют разностью.

Разность или вычитание обозначают знаком $\setminus$. Как следует из определения, не обязательно иметь $B \subset A$ для получения разности $A \setminus B$. Операция разности геометрически интерпретируется так, как это показано на рис. 3.

Дополнение. Если $B \subset A$, то разность $A \setminus B$ называют дополнением к множеству B во множестве A.

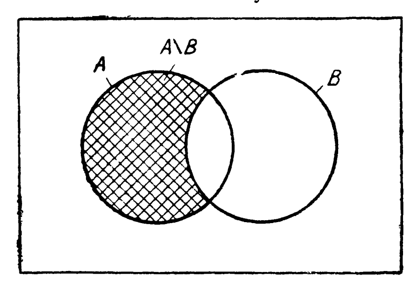


Рис 3. Операция разности.

Операцию дополнения иллюстрирует рис. 4.

Для исследователя, работающего, например, в области бионики, очень важно то, что, помимо операций над множествами, теория позволяет рассматривать так называемые отображения одного множества на другое. В прикладном плане это полезно потому, что позволяет математически строго учитывать отношения между элементами множества (связи

между объектами, входящими в множество), а также отношения между элементами одного и другого множества. Таким образом, можно сравнивать между собой множества не только количественно — больше, меньше, равны, но и качественно. Это позволяет выявлять аналогии при изменениях, претерпеваемых множествами (изоморфизм и гомоморфизм), структурные аналогии и т. д.

Другим специфическим разделом математического аппарата бионики является математическая логика. Даже если человек не намерен всерьез заниматься математикой, познание основных идей математической логики обогащает интеллект, вызывает живой интерес, развивает кругозор. Суть математической логики хорошо выразил математик П. С. Порецкий «Математическая логика по предмету своему есть логика, а по методу — математика».

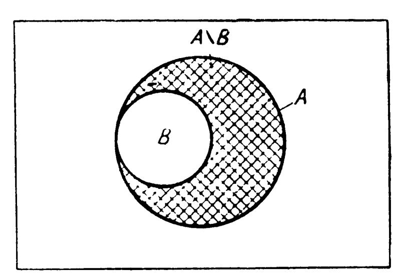


Рис. 4. Операция дополнения

Математика широко использует логику, как и теорию множеств, для собственных нужд, так что математическая логика — это необъятное поле деятельности «чистого» математика. В ней очень много интересных и трудных задач, и, что особенно любопытно, можно строить много разных логик, развивая каждую из них как самостоятельный раздел математики. Инженеры уже давно пользуются математической логикой в телемеханике, в автоматическом управлении, в вычислительной технике. В одном из последующих разделов будет показано, как можно использовать логику в работах по бионике. А пока коротко рассмотрим основные понятия математической логики.

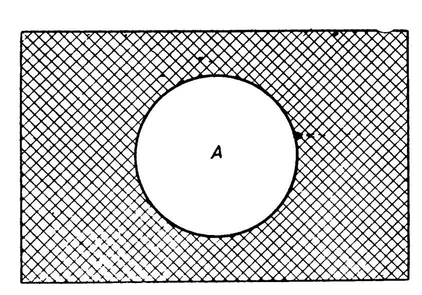


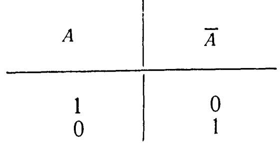
Рис 5. Геометрическая иллюстрация логической операции отрицания.

В кибернетике пока наиболее широко используется та часть математической логики, которую называют алгеброй логики, или исчислением высказываний. Под высказыванием понимают любое предложение, в отношении которого имеет смысл утверждение о его истинности или ложности. Высказываний одновременно истинных и ложных в двузначной логике быть не может.

Отдельные высказывания обозначаются большими буквами латинского алфавита A, B, C... Запись $A=1$ означает, что высказывание A истинно, запись $B=0$ означает, что высказывание B ложно. Два высказывания (например, A и B) называются эквивалентными, если значения их истинности обязательно одинаковы, т. е. высказывания A и B одновременно либо оба истинны, либо оба ложны Тогда можно записать $A=B$.

Для объединения простых высказываний в сложные используются логические связи. Приведем некоторые из них.

Отрицание высказывания. Отрицание высказывания A обозначается символом $\bar{A}$. Таблица зависимости значения истинности при отрицании высказывания имеет следующий вид:



A	$\bar{A}$
1	0
0	1

Отрицание отрицания высказывания эквивалентно самому высказыванию: $\bar{\bar{A}}=A$. Геометрически отрицание интерпретирует рис. 5.

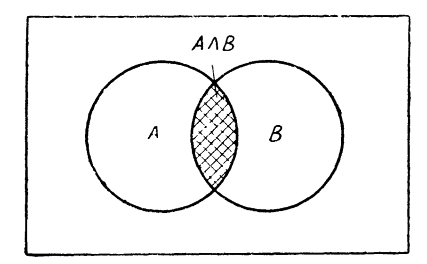


Рис. 6. Логическое произведение двух высказываний.

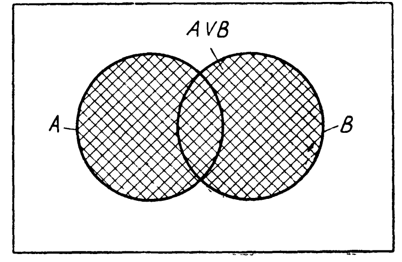


Рис 7 Логическое сложение двух высказываний.

Конъюнкция, или логическое произведение высказываний. Конъюнкция обозначается символом $\wedge$. Знак логической связи $\wedge$ читается как союз И. Таблица зависимости значения истинности сложного высказывания, образующего конъюнкцию, имеет вид:

A	B	$A \wedge B$	A	B	$A \wedge B$
1	1	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0

Геометрически конъюнкция может быть изображена в таком виде, как на рис. 6, т. е. как пересечение множеств, соответствующих высказываниям.

Дизъюнкция высказываний. Дизъюнкция высказываний обозначается символом $\vee$, который читается как союз ИЛИ. Между высказываниями A и B и сложным высказыванием $A \vee B$ имеет место следующая зависимость:

A	B	$A \vee B$	A	B	$A \vee B$
1	1	1	0	1	1
1	0	1	0	0	0

Геометрически дизъюнкцию высказываний A и B иллюстрирует рис. 7

Равнозначность двух высказываний. Равнозначность двух высказываний A и B символически обозначают как $A \sim B$ Таблица истинности имеет следующий вид:

A	B	$A \sim B$	A	B	$A \sim B$
1	1	1	0	1	0
1	0	0	0	0	1

Геометрически логическую связь «равнозначность» можно представить так, как это показано на рис. 8.

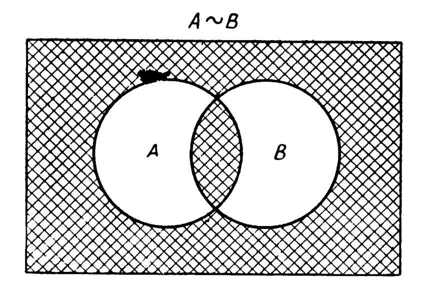


Рис. 8. Равнозначность двух высказываний.

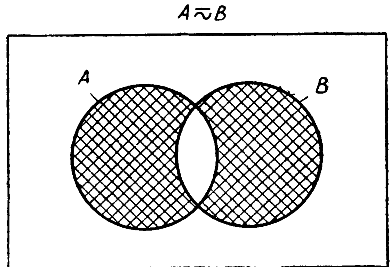


Рис 9 Неравнозначность двух высказываний.

Неравнозначность двух высказываний. Неравнозначность двух высказываний обозначается символом $\eqsim$, который читается как «неравнозначность». Таблица истинности имеет следующий вид:

A	B	$A \eqsim B$	A	B	$A \eqsim B$
1	1	0	0	1	1
1	0	1	0	0	0

Геометрически это представлено на рис. 9.

Импликация двух высказываний. Импликация двух высказываний обозначается символом $A \to B$, который читается так: «если A, то B». Таблица истинности для импликации имеет вид:

A	B	$A \to B$	A	B	$A \to B$
1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	0	1

Геометрически это интерпретирует рис. 10. Импликация не имеет смысла связи между причиной и следствием, т. е. из истинности высказывания A еще не следует истинность высказывания B.

Штрих Шеффера (несовместимость двух высказываний). Связь Шеффера двух высказываний A и B обозначается как A/B. Таблица истинности для связи Шеффера имеет вид:

A	B	A/B	A	B	A/B
1	1	0	0	1	1
1	0	1	0	0	1

Геометрически штрих Шеффера иллюстрируется рис. 11.

Обобщает названные два раздела математики теория алгоритмов. Под алгоритмом принято понимать предписание, определяющее содержание и последовательность операций, переводящих исходные данные в искомый результат. Алгоритм обладает тремя замечательными свойствами. 1) определенность, т. е. однозначный смысл, не оставляющий места для произвольного толкования; 2) массовость, т. е. применимость не к одной единственной, а к большому числу (классу) задач; 3) результативность, в силу чего после конечного числа элементарных актов выполнение алгоритма заканчивается и дает искомый результат.

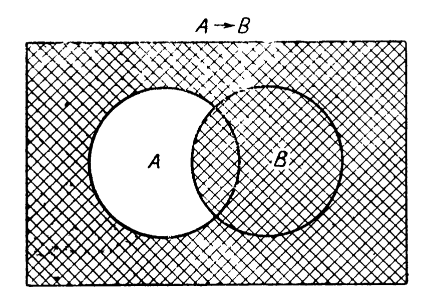


Рис 10 Импликация двух высказываний.

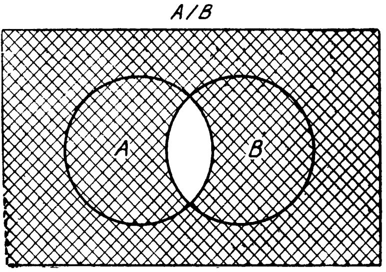


Рис 11. Логическая операция «штрих Шеффера».

Названные разделы математики — теория множеств, математическая логика, теория алгоритмов, позволившие ученым и инженерам создать программы «умных» автоматов, образуют основу теоретической базы кибернетики и бионики. Этим, конечно, не исчерпывается нужная бионику математика. Так, можно было бы еще назвать интересную геометрию — геометрию многомерных пространств. Эта геометрия позволяет строить пространства, координатами которых являются любые величины: признаки предмета, параметры сигнала, цвета, характеристики системы и т. д. Если у привычного пространства, в котором мы живем, всего три координаты, то в многомерных пространствах их может быть сколько угодно, даже бесконечное множество Геометрические образы многомерных пространств помогают исследователю не только четче представить задачу, но и найти ее решение.

Следует специально подчеркнуть, что введение этих необыкновенных разделов математики не принижает значения и других, традиционных для инженера математических дисциплин: дифференциального и интегрального исчисления, теории вероятностей и др. Более того, для биоников, занимающихся вопросами биомеханики, биоэнергетики, последние дисциплины могут оказаться намного важнее, чем первые три.

Конечно, из сказанного не следует, что для успешной работы в области бионики надо в совершенстве знать все перечисленные математические дисциплины. Для теоретиков это крайне желательно; для биоников, отдающих предпочтение биологическим исследованиям, требования снижаются, но представления о математике у них должны быть, иначе они не смогут успешно сотрудничать с другими представителями бионики из-за недопонимания методов и результатов. Бионикам, которые хотят заниматься технической реализацией, например, в радиоэлектронном исполнении, знание математики также необходимо, но в общей сложности по объему это не превышает тех знаний, которые нужны обычному специалисту по радиоэлектронным дисциплинам. В завершение следует только добавить, что, помимо необходимости знать математику как основной язык бионики, к этим математическим дисциплинам не может не привлекать самая обычная любознательность; ведь они не столько трудны, сколько интересны сами по себе.

Выше мы очень кратко рассмотрели некоторые особенности того математического аппарата, который формируется для нужд бионики. Точно так же следовало бы охарактеризовать те разделы морфологии, нейрофизиологии и других биологических дисциплин, которые необходимо знать математикам и инженерам, работающим в области бионики. Однако даже основные биологические понятия в отличие от математических невозможно изложить так коротко и компактно. Поэтому ограничимся указанием на бесспорную необходимость довольно глубоких знаний биологии для всех специалистов, занимающихся исследованиями в области бионики.

ГЛАВА ВТОРАЯ

НЕЙРОНЫ И НЕРВНЫЕ СЕТИ, ИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

КЛЕТКА, ЕЕ СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ

Все живое имеет клеточную структуру: от простейших одноклеточных организмов до высших животных и человека. В этом смысле живые клетки можно назвать «кирпичиками», из которых складываются самые причудливые и сложные органы животных. Однако, если заглянуть внутрь клетки, то нетрудно убедиться, что структура и функции «кирпичика» настолько сложны, что само по себе исследование отдельной клетки требует комплексного подхода биофизиков, биохимиков и ряда других специалистов, и сколько бы ни исследовалась клетка, будут оставаться и трудные вопросы, и неразрешимые проблемы. Живая клетка поистине неисчерпаема. Положение осложняется еще и тем обстоятельством, что в ходе эволюции осуществлялась специализация клеток, каждая из которых выполняет теперь только свои, специфические функции, а из этой специ-

фики функционирования вытекает и своя, присущая только этой клетке, структура.

Клетка содержит сотни разных белков. В некоторых клетках встречаются белки, свойственные только ей. Принято считать, что огромные (в масштабах микромира) белковые молекулы составляют те основные детали, из которых складывается основная структура клетки. Но и сами белковые молекулы имеют очень сложную структуру, без знания которой трудно определить функции молекулы. Это еще более осложняет картину: ведь на сегодня из сотен белков, входящих в состав клетки, полная структура известна только для пяти белков.

Помимо того, что белки образуют каркас основной конструкции клетки, они же выполняют многочисленные функции по управлению и осуществлению всех тех многочисленных биохимических и биофизических процессов, которые составляют интимную сторону жизнедеятельности клетки. Они же в той или иной степени определяют деятельность всех программ наследственности и, наконец, ту сложную и не изученную до конца деятельность, которую называют делением клетки и которая сопровождается не только возникновением новой клетки, но и передачей ей всей наследственной информации.

Академик Г. М. Франк образно называет живую клетку автоматизированным заводом в миниатюре, со множеством конвейеров, действующих одновременно, очень согласованно, собирающих и разбирающих молекулы вещества. Продолжая эту аналогию, можно себе представить гипотетического исследователя, у которого имеется возможность под микроскопом рассматривать и изучать действующий сложноорганизованный, полностью автоматизированный завод. Если иметь в виду самую крупную клетку, то можно сказать, что наш гипотетический исследователь может расположить исследуемый «завод» на предметном столике микроскопа и, сделав срез, увидеть сквозь окуляры внутреннее оборудование с разрешающей способностью, соответствующей десяткам метров настоящего завода. Сами срезы наш исследователь может производить с точностью, тоже не превышающей несколько метров. Ясно, что многие, очень важные детали будут выпадать из рассмотрения. Сам срез мгновенно выводит из строя некоторые из действовавших механизмов, и исследователь только иногда будет видеть то, что происходит в клетке в действительности. Для полноты аналогии предположим, что придуманный нами исследователь может делать микросрезы и вводить внутрь микроэлектроды, как это принято при исследовании клетки.

Микроэлектрод будет причинять меньше разрушений, особенно если он будет попадать в крупные подсобные помещения нашего гипотетического завода, но сразу заметим, что такие попадания дадут информации о главном на заводе меньше, чем попадания в узловые точки (нервные узлы своего рода). Легко представить себе, как сквозь крышу огромного автоматизированного цеха проходит полый внутри стеклянный цилиндр диаметром около 10 *м*. Но много ли можно узнать таким образом о внутреннем оборудовании цеха?

Можно и далее развивать предложенную аналогию, но это читатель без особого труда может сделать и сам. Конечная же цель проведения таких аналогий — это представить себе все те принципиальные трудности, с которыми сталкивается исследователь клетки при анализе ее действительной, тонкой структуры и функций.

Потребовалось более 300 лет напряженных исследований, огромного труда, большой изобретательности для того, чтобы возникли первые упрощенные представления о структуре клетки как состоящей из мешочка, наполненного бесструктурной, слегка мутноватой протоплазмой, в центральной части которой находится ядро клетки, а далее — более углубленные знания о тонких включениях, о мельчайших пузырьках и волокнах, заполняющих ядро. В современном представлении одиночная клетка — очень сложно организованная, пронизанная канальцами и ходами молекулярных размеров, динамичная система, в которой ежесекундно в строгом порядке осуществляются строго дозированные физико-химические взаимодействия десятков, если не сотен своего рода конвейеров. Мембраны — перегородки молекулярной толщины — разделяют ее на множество камер. Одновременно те же самые мембраны являются и местом химических взаимодействий веществ. Микроскопические отверстия в мембранах выполняют роль шлюзов, осуществляя направленное перемещение веществ, транспортируемых по всему пространству клетки. В отдельных клетках насчитываются тысячи таких полупроницаемых мембран и десятки тысяч других внутриклеточных структур. Пока еще трудно понять систему коммуникаций, служащих для передачи сигналов внутри клетки, но точно зафиксирована удивительная быстрота, с которой реагирует клетка на раздражения, удивительная подвижность в изменении структурной организации клетки.

Многие механизмы клетки, обнаруженные исследователями в ходе прямых наблюдений или умозрительных построений, все еще не имеют общепринятой трактовки и носят характер гипотез, предположений. Характерный пример — гипотеза А. Г. Гурвича о существовании клеточного поля. Правда, суть ее относится не столько к объяснению функционирования одиночной клетки, сколько к анализу взаимодействия ансамбля клеток: ведь организм состоит из огромного множества взаимодействующих клеток. Но все же рассмотрим этот пример, потому что многое здесь относится и непосредственно к одиночной клетке, а главное, что сам по себе пример характерен. Он очень наглядно иллюстрирует и безграничную многогранность проблемы, и революционность выдвигаемых идей.

А. Г. Гурвич предположил, что клеточные ядра являются источниками направленного излучения, воздействующего на окружающие клетки. Наибольшее воздействие испытывают близлежащие клетки. Но клетки окружения сами создают вокруг себя собственные поля, которые складываются с полями соседних клеток по правилу векторного сложения (понятие векторного излучения клетки введено с целью объяснения направленности действия предполагаемого излучения). Надо сказать, что гипотеза А. Г. Гурвича является формальной в том смысле, что она позволяет производить геометрические (векторные) расчеты формообразовательных процессов в живом организме и не объясняет физической природы предполагаемого излучения ядер клеток. Многочисленные проверки гипотезы дали хорошее совпадение расчетных данных с экспериментально наблюдаемыми результатами формообразования ансамбля клеток, например, в эмбриональном развитии зародыша. Что же касается физической стороны возможных клеточных излучений, то А. Г. Гурвичем еще в начале 20-х годов нашего столетия было открыто излучение в виде слабого ультрафиолетового свечения, возникающего в клетках в ходе некоторых физико-химических процессов. Близко расположенные

клетки воспринимают это излучение и отвечают на него направленным изменением внутренних процессов. В соответствующих условиях восприятие определенным образом дозированного излучения вызывает процессы деления клеток. Такое митогенетическое излучение можно зарегистрировать с помощью физических приборов, но так как интенсивность излучения очень мала, требуется использование очень тонких методов регистрации. Сейчас, когда исследователи располагают фотоумножителями, регистрирующими попадание на мишень одиночных фотонов, удалось накопить достаточный статистический материал по митогенетическому излучению для большого числа разнообразных клеток. Число примеров существования загадочных, частично объяснимых или непонятных пока механизмов и явлений клеточной активности можно было бы преумножить. Но и без того можно сделать некоторые выводы.

Можно с большой уверенностью утверждать, что одиночная клетка — это биофизическая система, проявляющая большое число физических взаимодействий механической, электрической, оптической и иной формы. Природой только для осуществления процессов внутри клетки созданы многочисленные генераторы, преобразователи, аккумуляторы энергии, транспортные системы разных форм перемещения вещества и ряд других механизмов. Некоторые из них могут оказаться принципиально новыми и для теоретической и для технической физики в современном ее понимании. В этом смысле одиночная клетка — прекрасный объект бионических исследований физического уклона.

Одиночная клетка — это сложноорганизованная биохимическая система, в быстропротекающих «технологических» процессах которой участвуют десятки тысяч агентов. Среди них особая роль принадлежит ферментам — белкам, проявляющим так называемые ферментативные реакции. Ферменты вызывают фантастическое ускорение хода процессов химического взаимодействия веществ, действуя селективно, строго специфично на вполне определенное вещество и в то же время каким-то образом взаимодействуя друг с другом, так что результат (продукт) предыдущей реакции служит основой для начала последующей. Это и дает основание сравнивать биохимические процессы в клетке с работой хорошо отлаженного конвейера.

Современное химическое производство так же широко использует ускорители химических реакций (катализаторы), но такое производство базируется на применении высоких температур, высоких и сверхвысоких давлений. Сравнивая действие ферментов и соответствующих катализаторов, используемых в современном производстве, химики убеждаются в значительно большей эффективности ферментов (для некоторых сопоставлений разница в быстродействии составляет восемь порядков, т. е. скорость протекания соответствующих процессов различается в сотни миллионов раз!). Если учесть, что все процессы внутриклеточного химического «производства» протекают при нормальном (около 1 *атм*) давлении и при низких температурах (около 30—40° С), то станет ясно, что бионическое заимствование «технологии» химического производства в клеточных системах имеет громадное практическое значение.

Наконец, должно быть очевидно, что протекание всех физико-химических процессов в такой сложноорганизованной, динамической и согласованной системе, как живая клетка, предполагает высокий уровень самоорганизации, управления, саморегулирования и само-

настройки. Отсюда налицо бионический аспект исследования одиночной клетки.

Открытие и бионическое использование принципов программирования основных процессов жизнедеятельности клетки будут полезными для технической кибернетики в силу микроминиатюрности всех тех устройств, которые участвуют в работе механизмов управления (вспомним о размерах управляемой системы — клетки). Не меньший интерес представляют те принципы, которые обеспечивают высочайшую надежность системы управления. Ярким примером необычайной надежности работы программ и механизмов управления является механизм яйцеклетки. У разных видов животных миллионы и даже миллиарды раз яйцеклетка развивается во взрослое существо, изумительно точно повторяющее «программы» развития и жизнедеятельности огромного числа предшествующих поколений.

В ходе эволюции живого, в ходе появления многоклеточных организмов происходила одновременно специализация отдельных клеток. Так образовались клетки кожного покрова, защищающие организм от вредных воздействий внешней среды, клетки мышечной ткани, обеспечивающей телодвижения животного и его перемещение в пространстве. Так возникли многочисленные клетки для сбора информации о состоянии внешней среды и о внутренних состояниях организма (экстерорецепторные клетки и интерорецепторные клетки). Позднее ансамбли таких клеток у ряда животных образовали воспринимающую часть анализаторов. Так возникли сетчатка глаза, поле обонятельных луковиц и другие рецепторные образования. В связи с тем, что химические посредники как переносчики информации перестали полностью удовлетворять потребности протяженных коммуникационных систем, возникли сети клеток, предназначенные для более быстрой и эффективной передачи осведомительной и управляющей информации. Так появились специализированные нервные клетки (нейроны).

Специализация клеток для выполнения различных функций привела к появлению сильных структурных различий. Организм высокоорганизованного животного состоит из огромного числа клеток разных типов. Особое место в ассортименте клеток принадлежит нейронам, обеспечивающим основные логико-информационные процессы в организме и образующим основную систему передачи и обработки информации, включая сюда высшее достижение живой природы — головной мозг. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что нервная сеть обеспечивает основную кибернетическую систему организма, но не единственную. Дело в том, что, помимо нервной системы, существует еще такая система, как гуморальная, с помощью которой организм регулирует протекание ряда процессов жизнедеятельности, посылая с током крови «химические информационные агенты» (гормоны). Но на этих, несомненно, интересных механизмах мы останавливаться не будем, а деятельность нейрона и нервных сетей рассмотрим несколько подробнее, тем более что в проблеме бионического моделирования нейронов и нервных сетей имеются несомненные успехи.

НЕЙРОНЫ И НЕРВНЫЕ СЕТИ

Большое внимание, которое уделяется в бионике исследованию нейронов, определяется тем обстоятельством, что техническая кибернетика остро нуждается в широком ассортименте функциональных элементов.

Кибернетика устанавливает общность процессов управления и связи в живых организмах и кибернетических устройствах. Однако наряду с общими свойствами между ними имеются и весьма существенные различия в поведении и характеристиках. Эти различия объясняются не только количеством элементов, из которых построены сети управления, но и свойствами этих элементов.

Нейрон живого организма представляет собой элемент, который может находиться в двух состояниях — возбуждения и торможения. Таким образом, нейрон в весьма упрощенной трактовке по своим функциям может быть уподоблен двухпозиционному элементу типа реле (электромеханического, лампового, транзисторного). Однако неправильно представлять себе дело таким образом, что достаточно создать кибернетическое устройство с количеством реле, приближающимся к количеству нейронов в организме (порядка 10^9—10^{10} элементов и более), чтобы это устройство могло полноценно имитировать свойства живых организмов.

Одна из причин этого заключается в несравненно большей гибкости нейронов по сравнению с современными техническими элементами, что обусловлено значительно более сложной и тонкой организацией нейрона.

Создание сложноорганизованных кибернетических систем требует использования технических элементов, значительно превосходящих по своим логическим возможностям современные относительно примитивные двухпозиционные элементы релейного действия. При этом наряду с методами инженерного синтеза новых элементов с заданными характеристиками возможен и другой путь — заимствования некоторых свойств и логических решений органической природы путем изучения структуры и функций нейронов и создания более или менее адекватных им технических моделей. Очевидно, что если выбрать этот путь, то прежде всего необходимо ознакомиться с основами строения и функциями нейронов и нервных сетей.

Нейрон представляет собой основной структурный элемент нервной системы. Существует значительное количество различных типов нейронов, отличающихся друг от друга как по своему строению, так и по функциям, т. е. имеющих некоторую специализацию. Так, различают рецепторные нервные клетки, воспринимающие сигналы извне и преобразующие внешний раздражитель в специфический нейрофизиологический импульсный процесс. Клетки, передающие информацию по сети и осуществляющие ее преобразование (фильтрацию, перекодирование и др.), называют центральными нейронами.

Наконец, клетки, управляющие исполнительными механизмами — мышцами, железами, называют обычно мотонейронами. Наиболее полно исследованы мотонейроны, на которые обычно и ссылаются при обсуждении общих вопросов функционирования и структурной организации нейронов.

Схематическое изображение нейрона приведено на рис. 12. При исследовании под микроскопом удается различить четыре основные части нейрона: 1) тело клетки; 2) дендриты (древовидные отростки); 3) входы, по которым к телу клетки подводятся импульсы раздражения; 4) аксон, или нейрит,— волокно, являющееся выходом, по которому проводится возбуждение из клетки.

Тело клетки имеет обычно размеры менее 0,1 *мм*. Тело и аксон окружены мембраной, которая отделяет содержимое клетки от окру-

жающей среды. Дендриты имеют диаметр около 0,01 *мм* и длину от долей миллиметра до десятков сантиметров. Количество их отростков может достигать нескольких десятков и даже сотен. Боковые поверхности отростков дендритов в свою очередь покрыты своеобразными выростами, или шипиками, имеющими вид плотной ножки диаметром менее 0,5 *мк*, заканчивающейся утолщением. Общее количество шипиков на дендритной системе одной клетки может достигать десятков тысяч. Роль шипиков в настоящее время еще не выяснена, но имеются предположения, что они служат для восприятия нервных импульсов от других нервных клеток.

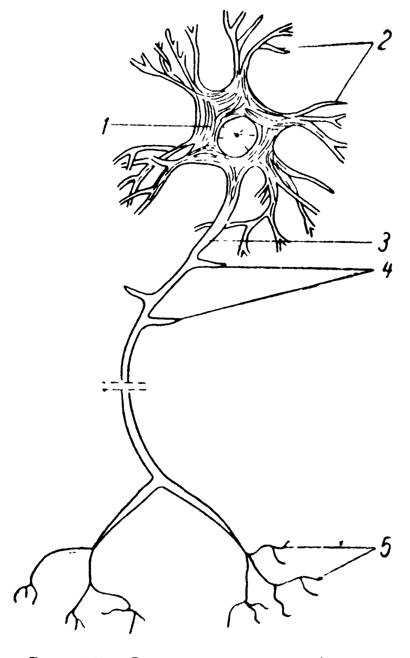


Рис. 12. Схематическое изображение нейрона.

1 — тело клетки; *2* — дендриты; *3* — аксон; *4* — коллатерали; *5* — концевое разветвление аксона.

Каждая клетка, будь то рецепторный или центральный нейрон, имеет аксон — относительно длинное волокно, которое в ходе эмбрионального развития организма вырастает из тела клетки и растет к предназначенной ему точке тела животного.

Длина аксона нервных клеток человека колеблется от долей миллиметра до 1,5 *м*. Аксон заканчивается концевым разветвлением, или «кисточкой». Кроме того, у аксона имеются короткие боковые ответвления — коллатерали, образующие с соседними нейронами сложные сети. Аксоны составляют осевую часть нервных волокон, пучки которых образуют нервы.

Нервы в организме играют роль линий связи между рецепторными нервными клетками с чувствительными окончаниями, воспринимающими информацию, и исполнительными, или эффекторными, клетками, обеспечивающими соответствующие реакции отдельных органов или участков организма.

Совокупность всех этих элементов, предназначенных для восприятия, проведения и переработки информации, а также для выдачи управляющей информации, образует нервную систему. Таким образом, нервная система осуществляет связь организма с внешней средой, взаимосвязь органов и тем самым регуляцию и координацию всех функций организма.

Функционально вся деятельность нервной системы основана на процессах возбуждения и торможения. Возбуждение возникает под влиянием электрических, тепловых, химических и механических раздражений и распространяется по нервной системе в виде нервных импульсов, скорость проведения которых по нервным волокнам не

превышает 120 *м/сек* (у человека); у беспозвоночных животных эта скорость значительно ниже.

Сами по себе нервные волокна способны проводить импульсы возбуждения в равной степени в обоих направлениях. При этом в них возникают так называемые токи действия, обусловленные тем, что возбужденная часть нерва становится электроотрицательной по отношению к части, находящейся в состоянии покоя.

Однако в организме все нервные волокна в естественных условиях своего функционирования проводят импульсы возбуждения всегда лишь в одном направлении — от центра к периферии (центробежные нервы) или от периферии к центру (центростремительные нервы). Такое одностороннее проведение импульсов объясняется особыми свойствами синапсов, т. е. мест перехода от одной нервной клетки к другой, или, другими словами, областей связи (контакта) нервных клеток друг с другом.

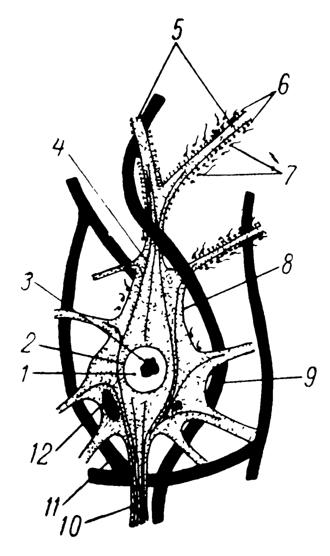


Рис. 13. Детали строения нейрона.

1 — ядро; *2* — ядерная оболочка; *3* — хроматин ядра; *4* — нейрофибриллы; *5* — дендриты; *6* — шипики; *7* — синапсы; *8* — оболочка клетки; *9* — артериальный капилляр; *10* — аксон; *11* — венозный капилляр; *12* — хроматиновое вещество.

Синапс проводит возбуждение только в одном направлении: с окончаний аксона одного нерва на дендриты и клеточное тело другого нейрона. Расположение синапсов, а также некоторые детали строения нейрона показаны на рис. 13, из которого видно, что каждый нейрон может возбуждаться через множество синаптических контактов, расположенных вдоль дендритов и на теле нейрона. Количество синапсов на крупных нейронах может измеряться тысячами.

Передача возбуждения через синапс, кроме односторонней проводимости, характеризуется и другими интересными особенностями. В синапсе происходит замедление проведения возбуждения: возникает так называемая синаптическая задержка. Прохождение возбуждения через синапс как бы подготавливает почву и облегчает прохождение через него следующего возбуждения. Одно из объяснений механизма этого явления заключается в том, что при поступлении раздражения в синапсах происходит выделение особого вещества (ацетилхолина), играющего роль медиатора (химического посредника) при передаче нервного возбуждения. После накопления определенного количества медиатора происходит возбуждение нейрона, который ведет себя, таким образом, как пороговый элемент.

Однако по современным представлениям у высокоорганизованных животных основная роль при передаче возбуждения через синапсы отводится не химическим посредникам, а так называемым электрическим потенциалам действия, подводимым к синапсам от

разветвлений аксона. Такое объяснение механизма передачи возбуждения больше соответствует действительной его скорости. Ацетилхолин при этом играет роль не переносчика возбуждения, а вещества, повышающего возбудимость нейрона и облегчающего реакцию клетки на последующие импульсы.

Еще одно важное свойство нейронов, обусловливающее сложность и гибкость их логических возможностей, заключается в способности к пространственной и временно́й суммации раздражений.

Пространственная суммация заключается в том, что уровни отдельных раздражений, недостаточные для возбуждения нейрона, будучи приложены к нему одновременно через два или несколько синапсов, могут вызвать срабатывание нейрона (его возбуждение).

Временно́й суммацией называют явление, заключающееся в том, что малые по своему уровню сигналы — подпороговые раздражения, следующие один за другим через достаточно короткие промежутки времени, также приводят к возбуждению нейрона. В механизме возбуждения нейрона часто происходят процессы суммации раздражений как в пространстве, так и во времени. При этом следует учитывать, что роль предыдущих импульсов раздражения для возбуждения нейрона становится тем меньшей, чем больше времени прошло после их появления. Имеет место как бы затухание их следов, которое происходит приблизительно по экспоненциальному закону.

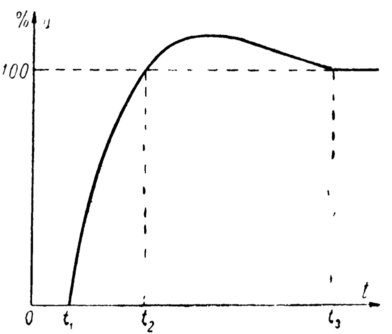


Рис. 14. Кривая изменения возбудимости нейрона.

Импульсы раздражения могут оказывать на нейрон не только возбуждающее, но и тормозящее действие. Затормаживающий импульс может сделать невозможным срабатывание нейрона от импульсов, поступивших на другие входы. Источником тормозящих импульсов по теории, предложенной Экклсом, являются особые вставочные нейроны (клетки Реншоу), которые возбуждаются обычными нервными импульсами. Аксоны клеток Реншоу заканчиваются на других клетках синапсами, выделяющими особый медиатор тормозящего действия.

После срабатывания нейрона возбудимость его претерпевает ряд изменений. Эти процессы иллюстрируются кривой, показанной на рис. 14, где по оси абсцисс отложено время t, истекшее после срабатывания, а по оси ординат — относительная возбудимость u нейрона в процентах. Как видно из рисунка, следующее срабатывание нейрона может произойти только через некоторый промежуток времени t_1, который носит название периода абсолютной рефрактерности и длится от 0,4 до 2 *мсек*. В течение этого времени пороговый уровень нейрона как бы оказывается равным бесконечности, а возбудимость его равна нулю. После окончания такого периода полной невосприимчивости происходит постепенное, в течение нескольких десятков миллисекунд, снижение порогового уровня до нормальной величины. Этот период (от момента t_1 до t_2) носит название периода относительной рефрактерности. По-видимому, явление

рефрактерности обусловливается необходимостью восстановления энергетических ресурсов нервной клетки, расходуемых во время функциональной деятельности нейрона.

После окончания периода относительной рефрактерности наступает фаза повышенной возбудимости (период t_2—t_3), в течение которой возбуждение нейрона может возникнуть и при раздражении подпороговой величины. Наконец, в некоторый момент времени t_3 восстанавливается нормальная возбудимость нейрона.

Импульс, выдаваемый нейроном при срабатывании, характеризуется, как правило, некоторой стандартной амплитудой и длительностью, так что энергию импульса в первом приближении можно считать постоянной по величине.

ТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОНОВ

При техническом моделировании тех или иных процессов, элементов и узлов живых организмов, осуществляемом с позиций бионики, отнюдь не следует стремиться к воспроизведению всех характеристик оригиналов. Преследуя цели создания высокосовершенных кибернетических устройств, следует стремиться к моделированию лишь тех функций и характеристик, которые повышают гибкость, надежность, экономичность и другие показатели кибернетической техники. В то же время целесообразно создавать модели, лишенные недостатков своих биологических оригиналов.

Например, при моделировании нейрона желательно, с одной стороны, по возможности более полно воспроизвести его гибкие логические функции, обусловленные описанной ранее способностью к пространственной и временно́й суммации раздражений и множественностью входов. С другой стороны, моделирование такого явления, как относительно длительный период рефрактерности, биологически обусловленный необходимостью отдыха и восстановления энергетических ресурсов клетки, может оказаться необязательным, а зачастую и нежелательным в технических моделях нейронов.

Создавая техническую модель нейрона (рис. 15), целесообразно, по-видимому, принимать во внимание следующее.

1. Схема модели нейрона должна иметь множество (n) входов, на которые могут в различные моменты времени поступать сигналы $p_1, p_2, \ldots, p_n$.

2. Входные сигналы воздействуют на нейрон через синаптические контакты. Величина, характеризующая степень влияния данного входа на состояние нейрона, называется весом входа, или синаптическим числом: $S_1, S_2, \ldots, S_n$.

3. В синаптических контактах происходит задержка поступающего сигнала на некоторое время t_c.

4. Воздействие некоторого i-го входа на тело нейрона в данный момент времени количественно характеризуется произведением p_iS_i.

5. Результирующее воздействие на тело нейрона определяется суммой воздействий от всех n входов (пространственная суммация) и предысторией, т. е. суммой предшествующих воздействий с учетом затухания их по экспоненциальному закону с некоторой постоянной времени τ (временна́я суммация).

6. Срабатывание (возбуждение) модели нейрона должно происходить лишь в том случае, если результирующее воздействие превысит некоторое пороговое значение K.

7. При срабатывании модель нейрона должна выдавать на параллельные выходы, соответствующие концевым разветвлениям аксона, стандартный сигнал P.

Надо сказать, что, придерживаясь таких представлений о работе нейрона, мы упрощаем действительную сложную нейрофизиологическую картину, которую можно наблюдать при детальном исследовании нейрона. В этом смысле допущения 1 — 7 позволяют создавать очень неточные модели нейрона. Они заведомо непригодны для исчерпывающего модельного исследования нейрона в рамках нейрофизиологии. Но эти представления, упрощающие реальную

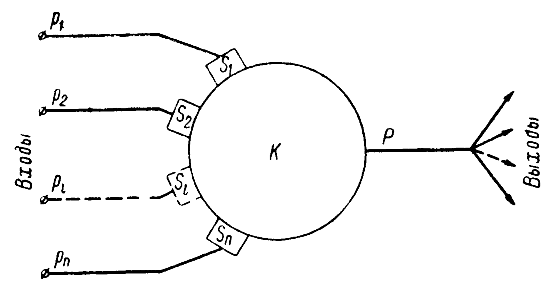


Рис. 15. Модель нейрона (схематическое изображение).

картину, позволяют создать модели нейронов, пригодные для использования в качестве нейроноподобных логических элементов.

С тем чтобы подчеркнуть формальный характер используемых аналогий в модели нейрона, будем далее называть такие модели формальными нейронами.

Логические свойства формальных нейронов широко исследованы в работах разных авторов. В некоторых из этих работ использованы представления, отличающиеся от тех, которые были введены выше.

В одном из предыдущих разделов были приведены логические функции и показано их геометрическое представление с помощью специальных диаграмм — кругов Эйлера. В теории формальных нейронов чаще пользуются диаграммами Венна. Если вместо кругов применить треугольники, то принцип построения диаграмм Венна можно пояснить с помощью рис. 16. Здесь площадь левого треугольника обозначает область значений переменной x_1, а площадь правого — область значений переменной x_2. Общая часть треугольников (заштрихованная область) соответствует области значений логической функции умножения двух переменых $x_1 \wedge x_2$. Рядом на рис. 16,*б* одна из сторон треугольника показана жирной линией, а остальные стороны обведены пунктиром. Наконец, на рис. 16,*в* показан окончательный вид диаграммы Венна, на которой жирная точка соответствует ранее заштрихованной области пересечения переменных $x_1 \wedge x_2$ и одновременно символизирует выполняемую логическую операцию — умножение (конъюнкцию).

Четыре угла, образуемых отрезками прямых в диаграмме Венна, позволяют представить таблицу истинности для любой логической функции двух переменных. Значение «истинно» отмечается

жирной точкой в соответствующем секторе диаграммы, а значение «ложно» — отсутствием точки в секторе.

Это не единственный возможный способ трактовки диаграммы Венна. К такому же графическому представлению можно прийти, рассматривая его как способ разбиения части плоскости на некоторое число ячеек (для двух переменных — на четыре ячейки). Можно показать, как строятся диаграммы Венна для трех и более переменных, но возникает естественный вопрос о том, насколько нужны та-

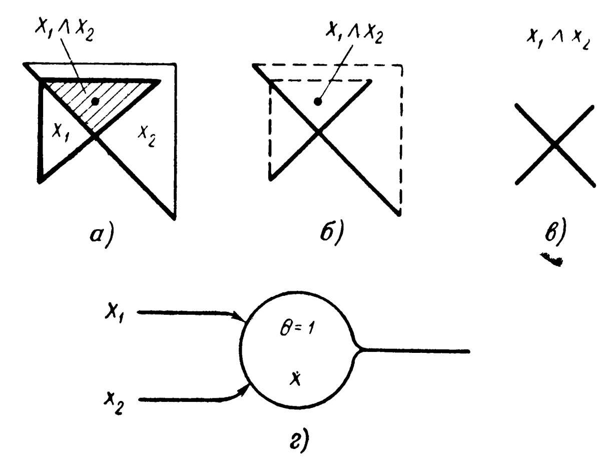


Рис. 16. Иллюстрация принципа построения диаграммы Венна и схематическое обозначение логической операции, реализуемой нейроном.

кие обозначения. Все дело в том, что нейронные сети могут включать большое число нейронов. Каждый нейрон — это довольно сложная электронная (или какая-либо другая) схема. Чтобы не загромождать чертеж, вместо электронной схемы приводится сеть, на которой каждый нейрон обозначен кружком или треугольником. Но при этом остается непонятным, какие логические функции выполняет тот или иной нейрон. Стоит только проставить в каждом кружке (треугольнике) диаграмму Венна, как становится понятным назначение любого логического элемента (нейрона), становится возможным проанализировать логику работы всей нейронной сети. Кроме того, и анализ и синтез нейронных сетей предполагают всевозможные логические преобразования с целью минимизации сети, упрощения ее вида и т. д. Оказывается, что для таких преобразований нет необходимости изображать графически нейронную сеть. Достаточно записать на бумаге последовательность диаграмм Венна, соответствующих описанию работы каждого нейрона, и в соответствии с определенными правилами произвести операции над диаграммами Венна. Выполнив ряд операций — преобразований, получают искомый результат, например минимальную, предельно короткую запись в результате минимизации. По конечному результату последовательности диаграмм Венна можно опять построить нейронную сеть, на этот раз наиболее экономичную.

Входные сигналы, воздействующие на синапсы нейрона, разделяются на возбуждающие и тормозящие. Возбуждающие входы нейрона обозначаются стрелками, а тормозящие кружками. Схематическое изображение нейрона с двумя возбуждающими входами показано на рис. 16,*г*. Обозначения на теле нейрона показывают, что при пороге $\theta=1$ нейрон реализует операцию конъюнкции (логическое умножение). Фактически число входов нейрона может быть много больше двух, а значит, и диаграммы Венна выглядят сложнее, и порог может меняться, и даже синапсы могут рассматриваться

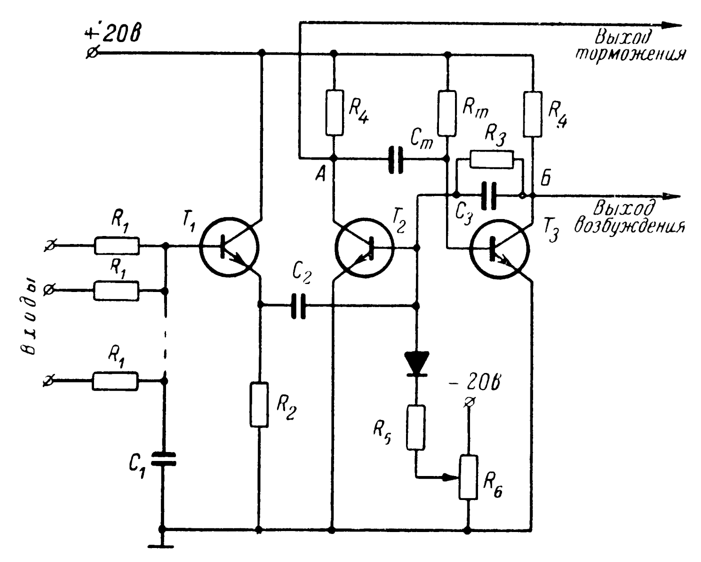


Рис. 17. Модель нейрона.

не просто как линии задержки, но как элементы, придающие тот или иной вес входному сигналу. К настоящему времени сложилась специальная теория (математическая теория нейронов и нейронных сетей), в рамках которой эти и многие другие вопросы рассматриваются очень подробно и строго.

Рассмотрим несколько моделей нейронов, созданных в различных институтах и лабораториях.

На рис. 17 изображена принципиальная схема одной из простейших моделей нейрона. Основной частью схемы является одновибратор (ждущий мультивибратор), собранный на двух транзисторах: T_2 и T_3 типа *n-p-n*. В устойчивом состоянии транзистор T_2 заперт отрицательным напряжением, подаваемым на его базу с сопротивления R_6. Значением этого напряжения определяется пороговая величина срабатывания модели нейрона. Пока транзистор T_2 заперт, транзистор T_3 находится в отпертом состоянии. При этом потенциал коллектора транзистора T_2 (точки *А*) равен напряжению питания +20 *в*, а коллектор транзистора T_3 (точка *Б*) находится под низким положительным потенциалом, обусловленным падением напряжения на сопротивлении нагрузки R_4.

При срабатывании одновибратора, когда происходит запирание транзистора T_3 и отпирание транзистора T_2, потенциал точки A скачком снижается, а потенциал точки $Б$ возрастает. В результате на выход возбуждения выдается положительный, а на выход торможения отрицательный импульс напряжения. Длительность последнего определяется значениями сопротивления R_m и емкости конденсатора C_m.

Время восстановления схемы (возвращения ее в начальное состояние) определяется в основном емкостью конденсатора C_3 и от-

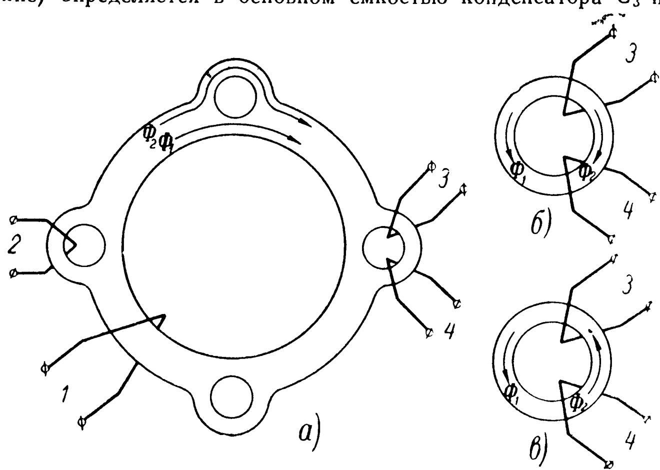


Рис. 18. Пороговый элемент на многоотверстном сердечнике.
а — общий вид; *б* — область вокруг выходного отверстия в начальном состоянии; *в* — область вокруг выходного отверстия в возбужденном состоянии.

части емкостью конденсатора C_2. В описываемой схеме это время (путем регулировки величин емкостей конденсаторов C_2 и C_3) можно изменять в пределах от 1 до 50 *мсек*.

Суммирование входных возбуждающих (положительных) и тормозящих (отрицательных) сигналов происходит на входе схемы, содержащей сопротивления R_1, конденсатор C_1 и транзистор T_1, включенный по схеме эмиттерного повторителя для устранения межсхемных влияний. Таким образом, имитируются процессы пространственной суммации воздействий, поступающих на различные параллельно включенные входы, и временной суммации благодаря накоплению энергии в конденсаторе C_1. Рост потенциала на конденсаторе за время действия входного импульса носит экспоненциальный характер.

На входы модели нейрона подаются импульсы с фиксированной амплитудой и длительностью 1 *мсек*, случайно распределенные во времени. На выходах схемы при ее срабатывании получается стандартный импульс длительностью 1 *мсек* напряжением 15 *в*. Предельная частота срабатываний равна 500 *гц*.

Рассмотренная схема позволяет довольно хорошо моделировать основные характеристики биологического нейрона. Однако она не

обладает свойством, эквивалентным адаптации, т. е. автоматическим изменением порога срабатывания в зависимости от величины входных сигналов.

Кроме описанной схемы, предложен ряд других вариантов моделей нейрона на лампах и транзисторах. Эти модели отличаются друг от друга как своими функциональными характеристиками, так и временными параметрами. Разработано также несколько вариантов моделей нейрона на магнитных элементах, в которых, используя частичное перемагничивание, легко имитировать пороговые свойства и процессы суммации входных воздействий.

Один из элементов подобного типа на сердечнике со многими отверстиями, изготовленном из материала с прямоугольной петлей гистерезиса, показан на рис. 18. Работа его основана на перераспределении потоков. По обмотке смещения *1* пропускается постоянный ток достаточной величины, для того чтобы намагнитить все сечение сердечника до насыщения. При этом поток $\Phi=\Phi_1+\Phi_2$ во всех сечениях сердечника имеет одно и то же направление, например по часовой стрелке.

Такое состояние сердечника будем считать начальным или заторможенным. При этом магнитное состояние зоны вокруг правого малого отверстия показано на рис. 18,*б*. Эту зону можно, очевидно, рассматривать как намагниченный до насыщения отдельный сердечник, в обоих полукольцах которого магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 направлены навстречу друг другу. Через малое отверстие продеты обмотки *3* и *4*. Обмотка *3* непрерывно питается переменным током, а обмотка *4* является выходной обмоткой элемента. Магнитодвижущая сила, создаваемая переменным током, в один полупериод будет совпадать по направлению с потоком Φ_1 в левой части зоны, а в другой полупериод — с потоком Φ_2 в правой части зоны. Так как весь материал находится в состоянии насыщения и дальнейшее увеличение потока в нем практически невозможно, то в обмотке *4* не будет индуктироваться э. д. с., что соответствует отсутствию сигнала на выходе модели нейрона.

Обмотка *2* служит входной обмоткой элемента, в которую подается суммарный ток входных сигналов. Если этот суммарный ток достигает некоторой пороговой величины, то произойдет переключение (изменение направления) магнитного потока Φ_2 в наружной части сечения сердечника. При этом магнитное состояние зоны вокруг малого отверстия будет таким, как это показано на рис. 18,*в*. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 будут протекать по кольцевой зоне вокруг малого отверстия против часовой стрелки. Тогда магнитодвижущая сила, создаваемая переменным током обмотки *3*, в один полупериод будет совпадать с магнитным потоком, и он вследствие состояния насыщения не будет практически изменяться по величине. Однако в другой полупериод при встречном направлении м. д. с. и потока последний будет уменьшаться. Затем в следующий полупериод величина его будет восстанавливаться и т. д. Вследствие изменений магнитного потока в обмотке *4* будет выдаваться сигнал до тех пор, пока после окончания достаточного по величине входного воздействия элемент под действием тока в обмотке смещения *1* не перейдет опять в начальное невозбужденное состояние.

Другие свободные малые отверстия сердечника могут быть использованы для разнообразных логических связей при моделировании сложных нервных сетей.

В литературе описаны также модели нейронов, основанные на электрохимических, термических и других явлениях. В частности, приводится сообщение о разработке так называемого нейристора — активного прибора с некоторыми свойствами нервного волокна. Нейристор характеризуется незатухающим распространением энергии, которое происходит с определенной скоростью, а также некоторым временем восстановления способности к проведению следующего импульса. При рассмотрении принципа действия нейристора часто используют в качестве аналогии бикфордов шнур, по которому без затухания перемещается огонь, только в отличие от бикфордова шнура нейристор может проводить возбуждение многократно.

Если говорить более точно, то можно сравнить нейристор с каналом связи, у которого по всей длине распределена энергия и в котором могут происходить некоторые активные процессы: процессы возбуждения линии точка за точкой, участок за участком. Возбуждение любой точки нейристорной линии можно себе представить как переход энергии этой точки линии в импульс возбуждения. Этот импульс воздействует на соседние точки линии, и в них также возникают импульсы. Таким образом, первичный одиночный импульс возбуждения как бы передается от исходной точки в одну и в другую сторону линии. Это похоже на огонь, который бежит по бикфордову шнуру в обе стороны от точки зажигания, если она выбирается где-то в середине шнура. Распределение энергии в линии, так же как и распределение пороха в бикфордовом шнуре, предполагается равномерным по всей длине. Таким образом, входной сигнал (начальный очаг возбуждения, загорания) определяет только момент начала распространения разряда, распространения импульса возбуждения, но никак не влияет на вид импульса возбуждения, передаваемого вдоль нейристорной линии. Основные параметры импульса возбуждения и скорость его распространения по нейристорной линии определяются только свойствами самой линии (величиной распределенной энергии, ее видом, способностью переходить в возбужденное состояние и т. д.).

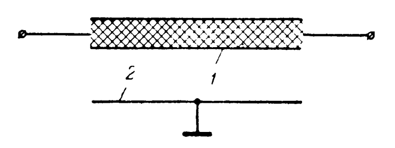


Рис. 19. Схематическое изображение конструкции нейристора.

Физическую работу нейристора можно промоделировать следующим образом. Пусть основу нейристора составляет полоска полупроводникового материала, используемого для изготовления терморезисторов. Такая полоска может быть изготовлена в виде пленки, которая играет роль одной из обкладок конденсатора *1* на рис. 19. Второй обкладкой этого конденсатора является обычный проводник *2*. Распределенная емкость конденсатора и выполняет роль линии с равномерно распределенной энергией. Если теперь в некоторой точке такой линии повысить температуру полоски полупроводника, то это приведет к понижению сопротивления в этом месте линии и как следствие к местному разряду распределенной емкости. При соответствующих параметрах описываемого устройства за этим последует разогрев соседних участков линии, прилегающих к начальной точке. Передача тепла от нагретой точки к соседним и рассматривается здесь как распространение теплового импульса возбуждения. Должно быть ясно, что в соседних точках после их

разогрева также произойдет снижение сопротивления и как следствие — местные разряды. Так, тепловой импульс возбуждения будет распространяться в обе стороны без затухания. За фронтом возбуждения остается зона разряда энергии, и требуется некоторое время для восстановления уровня энергии до прежней, начальной величины. Это время аналогично периоду рефрактерности нервного волокна. По истечении периода рефрактерности участок нейристорной линии вновь готов к функционированию, но за это время первоначальный импульс возбуждения успевает уйти далеко вдоль линии, так что для возбуждения восстановленных участков линии требуются новые сигналы возбуждения.

Суммируя основные свойства нейристора, подчеркнем следующее. Во-первых, нейристор обладает свойством продольной симметрии. Во-вторых, подобно нервному волокну нейристор позволяет импульсу возбуждения распространяться без затухания. В-третьих, он способен воспринимать возбуждения не в любой момент времени, а только через некоторые промежутки времени, определяющие максимальную частоту передачи импульсов вдоль линии. В-четвертых, после возбуждения в нейристорной линии наступает период рефрактерности, во время которого никакой по силе возбудитель не в состоянии активизировать линию. Наконец, в-пятых, если происходит встреча двух импульсов, то они не интерферируют, а взаимно уничтожаются, так как за фронтами импульсов обязательно следуют зоны рефрактерности. Последнее свойство отличает нейристорную линию от нервного волокна. Правда, в нервном волокне искусственно возбуждаемые (например, электротоком) импульсы могут распространяться в обе стороны, но наличие однопроводных синапсов препятствует проведению импульсов в обе стороны при нормальном, естественном возбуждении нервного волокна клетки.

Нейристорные линии, так же как нервные волокна, могут снабжаться ответвлениями, в которые будет передаваться импульс возбуждения, пришедший в точку разветвления.

Возможности технической реализации нейристора многие годы обсуждались на страницах технических изданий, но долго не было известно достоверно ни об одном действующем нейристоре. По-видимому, к первым техническим решениям следует отнести квантовые нейристорные линии. Это не что иное, как лазеры, выполненные на основе волоконной оптики. Тонкая стеклянная нить (оптическое волокно) из неодимового стекла прозрачна для света определенной части спектра. В стекле волокна в некоторой концентрации содержатся активные излучающие и пассивные поглощающие ионы. Правда, само по себе это еще не обеспечивает работу оптического волокна в режиме, подобном нейристорной линии, но здесь нет возможности подробнее останавливаться на работе квантового нейристора ввиду достаточной сложности теории лазерной техники. Укажем только, что исследователями было обнаружено явление гашения генерации лазера в неодимовом стекле под действием управляющего (гасящего) светового импульса. Стандартный световой импульс распространяется по оптическому волокну с некоторыми потерями. Из-за наличия определенного порога световые импульсы до определенной величины затухают, но более мощные импульсы, превысившие порог, усиливаются и распространяются по линии в виде стандартных импульсов, вообще говоря, не зависящих от параметров входных импульсов. Но так как для восстановления энергии (для насыщения линии) требуется определенное время на-

качки, то вслед за стандартным импульсом наступает период рефрактерности, в течение которого участок линии оказывается непрозрачным для светового импульса, пришедшего в этот период. Таким образом, были открыты свойства, которые необходимы и достаточны для того, чтобы промоделировать на оптико-волоконном лазере работу нейристорной линии. В ходе экспериментальных исследований квантовых нейристорных линий выявлены некоторые недостатки, основным из которых является необходимость в большой энергии накачки. Попытки обходиться меньшими энергиями накачки за счет использования большого времени приводят к резкому снижению скорости работы. Для моделирования работы нервного волокна это не существенно, так как в живом волокне быстродействие относительно невелико, не выше сотен герц, в то время как квантовый нейристор с временем релаксации порядка 1—100 *мксек* обеспечивает быстродействие в несколько килогерц. Ссылку на такого рода недостаток квантовых нейристоров следует понимать только в том смысле, что в принципе оптические методы обработки информации обеспечивают огромное быстродействие, много более того, что можно получить в электронных цифровых вычислительных машинах. Поэтому квантовые нейристорные линии в их современном виде — это своего рода шаг назад в технике быстродействующей оптической обработки дискретной информации. Вместе с тем следует отметить, что фирмой RCA (США) был создан действующий макет оптической вычислительной машины, выполненной на квантовых лазерах.

Другой интересной технической реализацией нейристора является нейристорно-туннельный диод. Для построения модели аксонного волокна была использована следующая аналогия. Полупроницаемая мембрана нервного волокна разделяет два электрически заряженных слоя: внешний, насыщенный ионами натрия, и внутренний, насыщенный ионами калия. При передаче импульса ионы натрия выходят наружу, благодаря чему внутренняя часть аксона в этом месте приобретает положительный заряд. После прохождения импульса калиево-натриевый «насос» восстанавливает нормальное состояние (равновесное распределение ионов по обеим сторонам мембраны). По аналогии со сказанным была выполнена нейристорная линия на основе туннельного диода, у которого имеются две области с проводимостью: одна типа p, а вторая типа n, имитирующие пограничные зоны мембраны аксона с насыщением ионами калия и натрия соответственно. Названные зоны дырочной и электронной проводимости разделены обедненной зоной, которая в свою очередь имитирует полупроницаемую мембрану. В одной из опубликованных работ описывается туннельно-диодный нейристор в виде линии длиной 1 *см* и шириной 100 *мк*. Длительность генерируемых импульсов, распространяющихся в нейристоре, может составлять доли микросекунды при скорости распространения около 10^5 *м/сек*, т. е. на три-четыре порядка выше, чем в аксоне животного. Здесь, как и в квантовых нейристорах, используется только полезная часть аналогий работы аксона и не делается попыток создания точной копии живого волокна.

Создание действующей оптической машины на квантовых нейристорах само по себе является хорошей иллюстрацией того факта, что с помощью нейристоров могут быть созданы логические элементы, запоминающие элементы и все устройства дискретной техники, которые необходимы для выполнения цифровой вычислитель-

ной машины. Интенсивные дорогостоящие работы, ведущиеся во многих крупных научных учреждениях ряда стран, наглядно доказывают, что этому направлению бионических исследований придается большое значение в перспективах развития быстродействующих вычислительных и информационно-логических машин.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

МЕХАНИЗМЫ КОДИРОВАНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

КОДИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Основное содержание всех процессов управления в живых организмах, в обществе и технике заключается в восприятии, накоплении, переработке и использовании разнообразной информации. При этом помехоустойчивость и надежность различных информационных устройств в значительной степени зависят от способов кодирования информации, а экономичность и габариты их — от принципов, которые положены в основу конструкции отдельных элементов и ячеек, предназначенных для накопления и хранения информации.

Пример исключительного совершенства, гибкости и экономичности являют собой механизмы кодирования, накопления, хранения и передачи по наследству информации в живых организмах, выработавшиеся в результате многих миллионов лет эволюционного развития органического мира.

При конструировании кибернетических устройств инженеры могли бы заимствовать в качестве прообраза некоторые из механизмов информационных процессов в живых организмах. К сожалению, многое в этой области еще неясно для науки. Однако стремительное развитие современной биологии и смежных с нею областей знания — биофизики и биохимии, основанное на все более широком использовании радиоэлектронной и кибернетической аппаратуры, а также математических методов обработки результатов эксперимента и описания биологических процессов, позволяет ожидать значительных успехов в раскрытии тайн механизмов управления в живых организмах.

Одной из интереснейших и очень важных проблем с практической точки зрения является проблема хранения и передачи в живых организмах наследственной информации, несущей в себе сведения о структуре и огромном многообразии свойств потомства. Если напомнить, что диаметр клетки, как правило, не превышает десятков микрон, то становится ясно, насколько сложным и совершенным должен быть механизм хранения в клетке огромного числа признаков, свойственных данному виду организма.

В соответствии с современными научными воззрениями основное значение в передаче наследственной информации имеют нуклеиновые кислоты. Они играют в клетке роль, подобную роли перфорированной ленты или перфокарты в цифровых вычислительных машинах. Подобно тому как на перфорированных носителях информация записана в виде определенного чередования пробитых и непробитых мест, нуклеиновые кислоты несут информацию, кото-

рая определяется линейной комбинацией нескольких основных повторяющихся единиц, определенным образом располагающихся по длине молекул.

Различают два вида нуклеиновых кислот — дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) и рибонуклеиновую кислоту (РНК).

Эти кислоты, хотя и похожи по своему химическому составу, отличаются друг от друга как по структуре, так и по функциям.

Основная функция носителя наследственной (генетической) информации принадлежит ДНК. Химический состав и количественное содержание ДНК во всех клетках данного живого организма одинаковы.

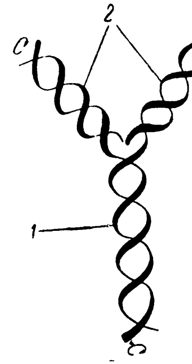


Рис. 20. Схема, иллюстрирующая механизм удвоения молекул ДНК.

1 — родительская спираль; *2* — дочерние спирали.

По мере усложнения организмов увеличивается и количество ДНК в их клетках. Так, если в клетках бактерий имеется около 10^8 нуклеотидов (структурных единиц) ДНК, то у млекопитающих на каждую клетку приходится уже до 10^{10} нуклеотидов. Молекулы ДНК можно представить в виде двух полинуклеотидных цепочек, закрученных одна относительно другой (рис. 20). При делении родительской клетки две молекулярные цепи, образующие двойную спираль ДНК, отделяются одна от другой, происходит процесс удвоения, или репликации, ДНК, причем в этом процессе существенную роль играет особый белок — фермент ДНК — полимераза.

Следующим этапом механизма передачи информации от родительской клетки дочерним является переписывание информации с ДНК на так называемую информационную РНК (и-РНК). Этот процесс, который называют транскрипцией, также происходит под контролем белка — РНК — полимеразы. Далее происходит процесс трансляции, заключающийся в том, что информация, переписанная на и-РНК, через посредство специальной транспортной РНК (т-РНК) переводится в аминокислотную последовательность белка. Трансляция является важнейшим этапом синтеза белка, именно на этом этапе происходит наследование белком генетических предписаний родительской клетки, причем любые ошибки в записи информации могут привести к роковым для организма последствиям, связанным с нарушением правильности структуры синтезируемых белков.

Важнейшим результатом исследований последних лет в этой области явилась расшифровка основ генетического кода. Выяснилось, что порядок чередования в белке 20 аминокислот записан в молекуле ДНК кодом — чередованием четырех нуклеотидов. При этом каждый нуклеотид играет роль как бы одной буквы, одного символа кода, а последовательность из трех нуклеотидов, так называемый кодон,— роль кодового слова. Общее количество возможных кодонов (сочетаний по три из четырех) составляет, очевидно, $4^3=64$. Синтез кодонов различного состава и исследование их роли приводят к все новым важным открытиям. При этом, по-видимому, изучение биофизиками и биохимиками механизмов кодирования информации в живых клетках может оказаться весьма полезным

и для математиков, и для инженеров, работающих в области технической кибернетики.

Существенный интерес для инженера могут также представить способы кодирования информации при ее передаче по нервным путям к соответствующему участку центральной нервной системы.

Подобно тому, как это имеет место в линиях связи, сигналы при распространении по нервным волокнам испытывают значительное затухание. Для компенсации затухания в линиях связи через определенные участки устанавливаются усилительные пункты (релейные станции), повышающие энергию сигналов. В нервных волокнах роль таких релейных станций выполняют так называемые перехваты Ранвье, расположенные в среднем на расстоянии порядка миллиметра друг от друга. Например, на протяжении нерва, идущего у человека от спинного мозга до пальцев руки, имеется около 800 перехватов Ранвье, играющих как бы роль усилительных пунктов.

Если бы интенсивность сигнала, воспринятого тем или иным элементом органа чувства (рецептором), кодировалась амплитудой нервного импульса (как это имеет место в технических системах связи с амплитудной модуляцией), то очевидно, что каждый перехват Ранвье должен был бы восстанавливать сигнал точно до того уровня, который имелся после предшествующего перехвата. Однако трудно себе представить идеально прецизионный биологический (как, впрочем, и технический) усилительный элемент, коэффициент усиления которого не отклонялся хотя бы на 1% от нормы. Но если принять, что коэффициент усиления каждого перехвата составляет 0,99 от нормы, то после прохождения через 800 перехватов амплитуда сигнала составила бы $0{,}99^{800}$, т. е. около 0,03% от нормы. С другой стороны, если бы усиление перехвата было на 1% больше необходимого, то после прохождения через 800 перехватов сигнал превысил бы норму в $1{,}01^{800}$, т. е. приблизительно в 3 000 раз. Кроме того, если учитывать огромный динамический диапазон рецепторов биологических организмов, при амплитудной модуляции все элементы нервной системы должны были бы обладать таким же большим динамическим диапазоном, что привело бы к их крайней неэкономичности, потребовало бы значительных размеров и т. д.

В живых организмах выработался весьма эффективный способ кодирования сообщений органов чувств (сенсорных сообщений), напоминающий частотную модуляцию в системах связи. При этом в сенсорных сообщениях наблюдается близкая к логарифмической зависимость частоты импульсов, передаваемых по нервному тракту, от интенсивности раздражителя.

Остановимся несколько подробнее на вопросах кодирования сообщений в зрительном анализаторе. Фоторецепторы глаза осуществляют преобразование светового раздражения в сигнал, соответствующий сложной импульсно-кодовой модуляции. В начале светового раздражения в нервном канале возникают импульсы с большой частотой. Затем при постоянной интенсивности освещения частота импульсов уменьшается. Новое повышение интенсивности света приводит к повышению частоты импульсов, после чего частота опять начинает снижаться. Таким образом, рецепторы кодируют информацию об интенсивности раздражителя, искажая ее в полезном, жизненно важном для организма направлении: они подчеркивают всякие изменения освещенности, т. е. движения, совершающиеся в окружающей среде. Этот механизм кодирования соответ-

ствует разработанной в последние годы системе дельта-модуляций, при которой по каналу связи передаются не абсолютные значения сигнала, а лишь сведения об изменении его амплитуды.

Описанное явление привыкания органов восприятия к сигналам с неизменяющимися характеристиками, называемое адаптацией, было особенно наглядно подтверждено опытами Ярбуса. Он укреплял на глазном яблоке человека присоску с вмонтированным в нее источником изображения, проектировавшимся на сетчатку. Присоска двигалась вместе с глазным яблоком, и, следовательно, проекция изображения на сетчатку глаза оставалась неподвижной. При неизменной интенсивности изображения зрительное восприятие его через некоторое время вообще прекращалось, возникало так называемое «пустое поле». При изменении интенсивности освещения изображение становилось видимым, но затем опять исчезало. Восприятие изображения восстанавливалось также при использовании мелькающего источника света, если только это мелькание совершалось с частотой, не превышающей некоторое критическое значение.

Для того чтобы в нормальных условиях человек все-таки мог видеть окружающие его неподвижные предметы, существует так называемый дезадаптационный процесс. Этот процесс заключается в незначительных колебательных движениях глаза, изменяющих освещенность отдельных участков сетчатки, и возникновении в рецепторах соответствующих разностных сигналов.

Естественно, что при передаче по нервным коммуникациям, как и при передаче по любым каналам связи, сигналы подвергаются действию помех. При этом если бы в живых организмах действовала наиболее экономичная система оптимального кодирования, при которой любое изменение кода дает новый код, имеющий определенное для организма значение, то процессы переработки информации характеризовались бы большим количеством ошибок, которые в определенных обстоятельствах могли бы привести к роковым последствиям. Однако эта опасность в значительной мере устранена существенной избыточностью кодирования. При этом коды сообщений становятся длиннее, передача и переработка информации замедляются, но зато вероятность ошибок уменьшается и, следовательно, возрастает надежность ее функционирования.

Можно было бы привести немало примеров того, как в живых организмах обнаруживаются механизмы кодирования и обработки информации, сходные с наиболее совершенными методами, применяемыми в технике. Очевидна плодотворность и обратного процесса использования в технике наиболее совершенных механизмов кодирования, имеющих место в органическом мире, для создания новых, все более надежных кибернетических устройств.

ПАМЯТЬ МАШИНЫ И ЧЕЛОВЕКА

В предыдущем параграфе были рассмотрены некоторые вопросы, относящиеся к механизмам хранения и передачи наследственной информации, обеспечивающей сохранение видов живых организмов. Эти механизмы несут в себе информацию о строении организма потомства, его основных функциональных характеристиках, передают по наследству безусловные рефлексы и инстинкты.

Однако в процессе роста и развития каждого индивидуума в нем происходит дальнейшее накопление огромных количеств

информации, связанное с фиксацией жизненного опыта, образованием новых связей и условных рефлексов, обучением и самообучением. Таким образом, происходит формирование поведения живого организма, которое оказывается обусловленным как унаследованной от родителей, врожденной информацией, так и информацией благоприобретенной, поступившей и продолжающей непрерывно поступать из внешней среды.

Емкостью и гибкостью устройств хранения информации, т. е. механизмов памяти, в значительной степени определяются возможности формирования сложной системы поведения данного организма.

Логические возможности, быстродействие и ширина диапазона решаемых задач у кибернетических машин также в значительной степени определяются характеристиками их блоков хранения информации. Поскольку выполнение каждой элементарной операции требует, как правило, обращения к блоку памяти, то и скорость выполнения операции, даже при весьма быстродействующих арифметических устройствах, ограничивается временем обращения к запоминающему устройству (ЗУ).

С другой стороны, решение сложных вычислительных задач или задач управления, которые также сводятся к последовательностям вычислительных и логических операций, требует ЗУ большого объема, способного вместить программу обработки информации с весьма большим количеством команд. Кроме того, в кибернетических устройствах целесообразно хранить некоторые неизменные части программы (так называемые подпрограммы, пригодные при решении различных задач), постоянные коэффициенты и справочные данные в отдельных блоках, называемых постоянными ЗУ.

Однако такие требования, как большая емкость и высокое быстродействие (малое время обращения), противоречивы. При большой емкости ЗУ приходится усложнять их адресную часть, предназначенную для отыскивания той запоминающей ячейки, в которой должна быть прочитана или записана соответствующая информация. Время поиска ячейки по заданному адресу увеличивается с увеличением емкости ЗУ.

В современных больших универсальных вычислительных машинах требуется хранить информацию в объеме сотен, тысяч и миллионов чисел (слов). Машины, предназначенные для перевода с одного языка на другой, и справочные логически-информационные машины должны иметь объем памяти, исчисляемый десятками и сотнями миллионов слов.

Применяя для хранения информации сменные бобины с магнитными лентами, можно легко получить практически неограниченный объем ЗУ. В самом деле, при плотности записи несколько десятков импульсов на миллиметр (одно число на 1 *мм*) на катушке магнитной ленты длиной 500 *м* можно записать около 500 000 чисел, а на сотне таких катушек можно хранить $5 \cdot 10^7$ чисел. Однако поиск ячейки в таком устройстве, требующий смены бобины и перемотки ленты, занимает несколько минут. В одном из наиболее совершенных ЗУ с записью на магнитной ленте емкостью более 10^7 слов время обращения удалось довести до 0,5 *сек*, но и это время совершенно не согласуется с временем выполнения арифметической операции, которое в лучших современных машинах составляет единицы и даже доли микросекунды.

Поэтому, говоря о емкости вычислительной машины, подразумевают обычно емкость так называемого оперативного ЗУ, время

обращения к которому должно быть соизмеримо с временем выполнения элементарной арифметической операции.

Учитывая, что кибернетические машины предназначаются для механизации определенных процессов человеческого мышления, уместно привести здесь некоторые сравнительные данные, характеризующие память человека и ЗУ электронных цифровых машин.

Прежде всего нужно отметить колоссальную емкость памяти человека. Как уже указывалось ранее, наш мозг содержит около 14 миллиардов нейронов, которые при упрощенной трактовке их функций можно представить себе как двоичные запоминающие элементы. Если округлить число нейронов до 10 миллиардов (10^{10}), то при таком количестве запоминающих элементов принципиально возможно запомнить 10^{10} двоичных единиц[1] информации.

Максимальная емкость ЗУ современных вычислительных машин весьма далека от этой величины, причем машины, которые будут построены в ближайшие годы, едва ли могут быть снабжены ЗУ подобной емкости. Достаточно указать, что общее количество электронных ламп и транзисторов, имеющихся в настоящее время на земном шаре, соизмеримо с количеством нейронов в мозгу одного человека.

В расчетах фактически используемой емкости памяти человека существует значительное расхождение. Ее оценивают величиной от 100 миллионов (10^8) до миллиона миллиардов (10^{15}) и даже до 10^{20} *бит*. Если принять любой предел емкости памяти, превышающий 10^{10} *бит* (что соответствует количеству нейронов), то нужно считать, как это предлагают некоторые ученые, что каждый нейрон, являясь сам по себе сложной системой, может накапливать значительное количество информации.

Одна из оценок пределов емкости человеческой памяти, предложенная Миллером, основывается на следующих рассуждениях. В качестве минимального предела он предложил установить объем памяти в 1,5 млн. *бит*, исходя из того, что человек, по его наблюдениям, способен запомнить по меньшей мере тысячу объектов, эквивалентных по сложности таблице умножения (количество информации, содержащееся в таблице умножения, равно около 1 500 *бит*).

При определении верхнего предела фактического объема памяти человека Миллер руководствовался следующим. Психофизиологическими наблюдениями установлено, что максимальная пропускная способность (скорость ввода информации) органов восприятия человека не превышает 25 *бит* в секунду. Таким образом, если предположить, что ввод информации в человека происходит непрерывно по 16 *ч* в сутки, то общее количество введенной и подлежащей запоминанию информации, скажем, за 80 лет может составить 42 миллиарда *бит*.

Нижний из этих пределов (по-видимому, сильно преуменьшенный) уже сейчас может быть практически реализован в ЗУ большой электронной машины. Верхний предел может быть принципиально реализован в ЗУ ограниченных габаритов. Так, в фотоскопических ЗУ можно было бы при огромной разрешающей способности фотографических материалов достичь плотности записи до 5 миллиардов *бит* на кубический дециметр. Однако современная техника не знает удовлетворительных методов записи и считывания информации

---

[1] Двоичная единица, или бит, — количество информации, получаемой в результате одиночного выбора из двух равновероятных возможностей (например, при падении подброшенной монеты той или иной стороной).

при такой огромной плотности записи. Здесь, очевидно, пришлось бы для записи применять лучевые дифракционные методы, а для считывания — методы электронной микроскопии.

Время обращения к памяти у человека колеблется от десятых долей секунды до часов и даже месяцев. Минимальное время здесь ограничивается, по-видимому, временем срабатывания (возбуждения) нейронов. Длительные же сроки запоминания сложной информации (например, заучивание ребенком таблицы умножения, актером большой роли и т. п.) и последующего воспроизведения, т. е. извлечения

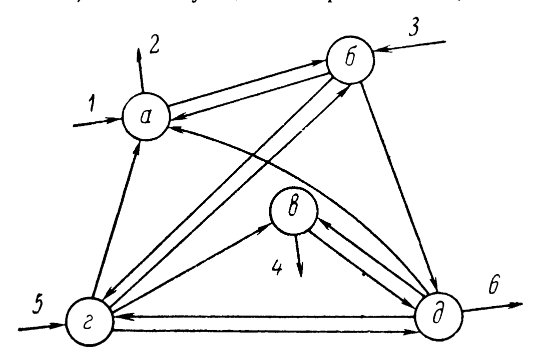


Рис. 21. Сеть из связанных между собой элементов.

ее из памяти, не могут быть объяснены с позиций элементарного поиска заданной ячейки в ЗУ машины.

В принципе механизм реализации функций записи, хранения и воспроизведения информации можно пояснить следующим образом (рис. 21). Пусть имеется некоторая схема, включающая множество элементов *а*, *б*, *в*... и случайных либо определенным образом организованных связей между ними. Эти связи могут быть односторонними (*б*⟶*д*, *д*⟶*а*...) или двусторонними (*а*⇄*б*, *б*⇄*г*...). Система обладает некоторым количеством входов (*1*, *3*, *5*) и выходов (*2*, *4*, *6*).

Память в такой системе может быть основана на следующих простейших принципах.

1. Под влиянием некоторого воздействия, например в результате поступления сигнала на вход *1*, может возникнуть циркуляция сигнала по тому или иному замкнутому контуру в системе, например *абга* или *абдга*. Для длительного поддержания такого процесса циркуляции необходимо, конечно, чтобы в замкнутые контуры входили активные элементы, обеспечивающие компенсацию затухания сигналов.

2. Под воздействием внешних сигналов или как результат более или менее длительных рециркуляционных процессов могут возникнуть устойчивые изменения состояний элементов *а*, *б*, *в*..., которые сохраняются и после прекращения воздействия на них. Эти элементы, которые будут выполнять роль запоминающих элементов, могут изменять свои состояния скачкообразно (дискретные бистабильные и мультистабильные элементы) либо плавно (аналоговые элементы).

3. Те же воздействия могут вызвать устойчивые изменения связей между элементами. Эти изменения могут заключаться в замыканиях или прерываниях связей, а также в скачкообразных или плавных изменениях их амплитудных, частотных и других характеристик.

В технических ЗУ используются все эти механизмы, причем наиболее широкое применение находит фиксация информации за счет изменения состояний элементов (триггеров, ферритовых сердечников,

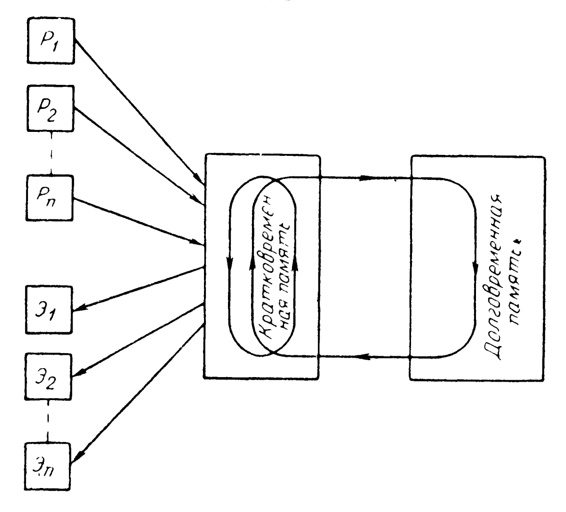


Рис. 22. Упрощенная блок-схема организации памяти.

запоминающих элементов на тонких магнитных пленках и др). В центральной нервной системе человека и высших животных действуют, по-видимому, все три перечисленных механизма памяти. В настоящее время имеется достаточно наблюдений, чтобы считать, что у человека имеются две фазы памяти — оперативная и долговременная. В первой информация хранится непосредственно после ее восприятия (в течение минут, десятков минут), по-видимому, за счет возникновения рециркуляционных процессов в замкнутых нервных контурах. Эта первая фаза запоминания должна длиться, вероятно, достаточно долго для того, чтобы успели произойти те или иные устойчивые структурные изменения, обеспечивающие последующее длительное хранение информации.

Весьма упрощенно процессы памяти можно описать, пользуясь примитивной блок-схемой, представленной на рис. 22. Внешняя информация, воспринимаемая рецепторами (P_1, P_2...), служит причиной возникновения рециркуляционных процессов, результатом которых (при достаточной их длительности и интенсивности) является фиксация информации в долговременной памяти. При воспроизведении информации из долговременной памяти вновь возникают рециркуляционные процессы, обеспечивающие возбуждение эффекторных органов ($Э_1$, $Э_2$...), через которые информация может выводиться вовне (речевой аппарат, рука и др.).

Рассмотрим вопрос о возможных физиологических механизмах, обусловливающих явления долговременной памяти.

При возбуждении нервных клеток происходит растекание (иррадиация) возбуждения за пределы этих клеток и охват им соседних клеток. Если возбуждение происходит одновременно в различных нервных центрах, то возбуждения от них растекаются навстречу друг другу и происходит замыкание новой нервной связи, или «проторение» между ними пути. Этот механизм, названный И. П. Павловым условным рефлексом, и лежит в основе простейших явлений памяти у животных и человека. При этом чем большее количество раз происходил описанный процесс, который при наличии обратных связей мог вызвать появление замкнутых контуров рециркуляции информации, тем более стойкие изменения (следовые явления) происходят в нейронах и межнейронных связях, входящих в эти контуры.

Какова же природа этих следов? Одной из гипотез образования следов является предположение о возникновении новых межнейронных связей (синаптических контактов) в результате так называемого нейробиотаксиса — роста протоплазматических нервных отростков под воздействием раздражителей.

Многие ученые считают основой долговременной памяти возникновение необратимых морфологических или функциональных изменений в синапсах (их геометрии, электрической проводимости, электрохимической активности и др.).

Большой интерес вызвала гипотеза, предложенная несколько лет тому назад Хиденом, согласно которой длительное хранение информации нервной системой обусловлено перестройкой оснований РНК в нейронах, т. е. в значительной степени аналогично механизму хранения генетической информации, описанному ранее.

Одна из особенностей памяти человека по сравнению с ЗУ машины заключается в том, что, как предполагает ряд ученых, определенные разделы содержания информации в мозгу не строго локализованы, т. е. нежестко привязаны к определенному участку коры, к определенной группе нейронов. Информация согласно этой точке зрения как бы диффундирует сквозь значительные объемы мозга. Этим можно объяснить, по-видимому, что прекращение деятельности некоторых групп нейронов в различных участках коры головного мозга зачастую не сказывается существенно на функциях памяти.

Интереснейшее явление, связанное с механизмом выборки информации из памяти, было обнаружено Пенфилдом. Оказывается, на височных долях поверхности больших полушарий головного мозга человека имеется так называемая интерпретационная, или толковательная область. При воздействии на эту область слабым электрическим током человек вспоминает многое из своего, казалось бы, забытого прошлого: картины, мелодии, содержание разговоров и пр.

При раздражении током различных участков коры содержание воспоминаний изменяется, но раздражение одних и тех же участков вызывает, как правило, одни и те же воспоминания. Этот факт можно истолковать как противоречащий предположению о диффузии хранимой в памяти информации в мозгу. Однако, с другой стороны, можно полагать, что нейроны толковательной области не являются сами хранилищами информации, а лишь играют роль ключей, открывающих выходные каналы при обращении к памяти.

Известно также явление гипертрофического обострения памяти,

или гипермнезии, возникающей в результате некоторых мозговых заболеваний. При этом человек с исключительной точностью вспоминает совершенно забытые события, например, может цитировать по памяти целые страницы ранее прочитанных книг.

Весьма важное качественное отличие памяти человека от технических ЗУ состоит в методе выборки информации. В вычислительных устройствах каждое число, слово или другая часть информации фиксируется по строго упорядоченной системе в некоторой ячейке ЗУ, имеющей определенный номер или адрес. При этом процесс выборки информации из блока памяти машины никак не связан с самим содержанием информации и строго подчиняется логике вычислительного процесса.

С другой стороны, процесс выборки информации из памяти человека всегда связан с определенными ассоциациями. Так, если человеку назвать слово «деревья», то у него немедленно в связи с этим возникнут образы ствола, листьев, их окраски, образы леса или парка и ряд других связанных по ассоциации элементов хранящейся в его мозгу весьма большой по объему информации, измеряемой зачастую сотнями или тысячами слов или чисел.

Такой механизм выборки информации не по четко заданному адресу, а по ассоциации значительно облегчает и ускоряет процесс выборки. Он может оказаться весьма полезным при построении информационно-логических машин, предназначенных, например, для выдачи сложных справок, что связано с выборкой больших количеств информации по тем или иным ее признакам.

Основное отличие ЗУ, построенных по ассоциативному принципу, заключается в том, что поиск информации в них производится не по заданному адресу ее местонахождения, а по некоторым признакам самой информации. Так, например, если обычную номерную адресную систему можно уподобить поиску адресата по названию улицы, номеру дома и номеру квартиры, то ассоциативную систему можно сравнить с поиском адресата по его полу, возрасту, цвету волос, семейному положению и другим индивидуальным признакам, характеризующим разыскиваемого человека.

При этом следует помнить, что те или иные признаки могут оказаться общими у ряда людей, и окончательный выбор должен быть обусловлен полным совпадением некоторого заданного количества признаков. В частном случае это может быть и один только признак. Например, если данное лицо достигло 18-летнего возраста (признак), то оно должно быть внесено в списки избирателей. В других случаях требуется совпадение весьма большого количества признаков, как, например, при подборе исполнителя какой-либо роли на съемках фильма.

Принцип реализации ассоциативного ЗУ может быть описан следующим образом. Пусть в ЗУ имеется N ячеек, в каждой из которых записано одно из N слов (объектов информации). Задача отыскания объекта информации сводится к определению той ячейки, в которой заданное количество введенных в ЗУ признаков совпадает с признаками слова, записанного в данной ячейке.

Подобное устройство может быть применено в диагностической машине, которая по определенному набору признаков, характеризующих состояние человеческого организма (симптомов), должна выдать диагноз заболевания, соответствующий данной комбинации признаков. Таким же образом автоматический определитель химических соединений, или геологических пород, или растений по ком-

бинации признаков должен выдавать наименование опознаваемого объекта.

Далее задача опознания может быть дополнена задачей выдачи разнообразной сопровождающей информации. Так, диагностическая машина может, кроме диагноза, выдавать информацию о рекомендуемом режиме больного и о методах лечения; определитель химических соединений может выдавать сведения о свойствах этих соединений, технологии их получения, применения и др.

Один из простейших вариантов блок-схемы ассоциативного ЗУ показан на рис. 23. Признаки, по которым должен быть отыскан объект информации, вводятся тем или иным способом (например, нажатием кнопки) в устройство набора признаков 1, которое связано шинами с соответствующими этим признакам ячейками в блоке ассоциативной памяти 2, в которых записаны определенные объекты информации.

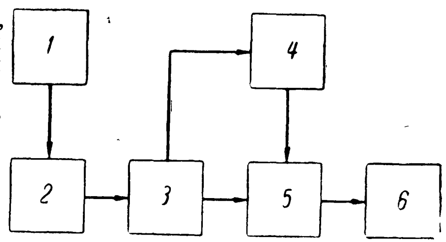


Рис. 23. Блок-схема ассоциативного ЗУ.
1 — устройство набора признаков; *2* — блок ассоциативной памяти; *3* — устройство управления; *4* — адресная система; *5* — блок сопровождающей информации; *6* — выходное устройство.

При полном совпадении заданных признаков, достаточных для опознания объекта информации, устройство управления *3* обеспечивает поступление на выходное устройство *6* названия объекта информации. Одновременно включается адресная система 4 блока сопровождающей информации *5*, и на выходе получается дополнительная информация, характеризующая опознанный объект.

Поиск объекта информации в ассоциативном ЗУ требует, очевидно, выполнения следующих операций.

1. Сравнение заданного поискового признака или признаков с записанными в ячейках признаками, причем последние должны сохраняться, т. е. должно быть произведено неразрушающее их считывание, предшествующее сравнению.

2. Выявление объекта информации, основанное на совпадении заданного набора признаков с введенными в ЗУ ассоциативными признаками.

3. Неразрушающее считывание опознанного объекта и связанной с ним сопровождающей информации.

На основе описанных общих принципов построен ряд макетов ассоциативных ЗУ. В этих макетах признаки информации записываются либо на перфокартах или конденсаторных матрицах, либо на специальных магнитных элементах, допускающих многократное неразрушающее считывание информации. Получили также известность макеты ассоциативных ЗУ, построенных на криогенных запоминающих элементах, работающих при сверхнизких температурах, близких к абсолютному нулю.

Наряду с описанным выше простейшим методом поиска в ассоциативных ЗУ объектов, признаки которых полностью совпадают с заданными признаками, предложен ряд модификаций ассоциативных ЗУ с поиском объектов, признаки которых более или менее

близки к заданным, с поиском всех слов, больших или меньших заданного, с поиском слов, находящихся в некоторых заданных пределах или, наоборот, вне этих пределов. Во всех этих ЗУ наряду с собственно функциями хранения должны выполняться более или менее сложные логические операции (сравнения, сортировки информации и др.), что приближает такие ЗУ к памяти человека, в которой тесно переплетаются функции хранения и логической обработки информации.

Дальнейшие поиски в области улучшения и усложнения схем ассоциативных ЗУ при одновременном совершенствовании, уменьшении габаритов и повышении экономичности и пластичности их элементов позволят создавать технические средства хранения информации, образцом которых служит наиболее совершенный запоминающий механизм — человеческая память.

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Центральной, важнейшей функцией сложных кибернетических систем является логическая переработка собранной и накопленной информации, причем конечной целью служит принятие того или иного решения, обеспечивающего сохранение целостности системы и ее оптимальное функционирование. Во введении уже отмечался один из важнейших недостатков современных кибернетических машин, заключающийся в строгом формализме программ их работы, в их гипертрофированной логичности, неспособности к принятию самостоятельных решений в сложных, не предусмотренных заранее человеком ситуациях. Этот и некоторые другие недостатки действующих цифровых кибернетических автоматов обусловлены, с одной стороны, структурой взаимодействия их блоков и, с другой стороны, методами программирования.

В то же время мозг человека, ряд функций которого призвана выполнять кибернетическая машина, успешно справляется с решением труднейших задач, и, если бы удалось выяснить основные механизмы его работы, он мог бы стать важнейшим прототипом при создании новых высокосовершенных машин. В связи с этой задачей попробуем описать хотя бы некоторые стороны организации и функционирования мозга с точки зрения возможностей использования этих сведений в бионических целях.

Говоря о структуре мозга, следует еще раз напомнить, что он представляет собой сложнейшую гигантскую мозаику более чем из 10^{10} нейронов и раз в девять большего количества так называемых глиальных клеток, плотно окружающих нейроны, тесно прилегающих к ним по всей длине вплоть до самых тонких окончаний. Если раньше предполагалось, что клетки глии выполняют только опорные и трофические (связанные с питанием нейронов) функции, то исследования последних лет позволяют утверждать о существенной роли глиальных клеток в процессах, связанных с проведением нервных импульсов, в формировании реакций и некоторых проявлениях функций памяти. Чтобы еще более подчеркнуть колоссальность количества отдельных элементов, содержащихся в системе мозга, отметим, что на каждый квадратный миллиметр поверхности коры головного мозга приходится около 20 000 нейронов.

Все сложные и многосторонние функции и свойства, которыми характеризуется мозг человека, совершенно очевидно определяются не только и не столько свойствами его «кирпичиков» (нейронов), сколько системой их организации в единый, удивительно слажен-

ный и целесообразно функционирующий ансамбль. В самом деле, никто и никогда не наблюдал в отдельном, изолированном нейроне каких-либо специфических психических функций типа памяти, сознания, разума. Эти свойства присущи только сложным, высокоорганизованным нервным системам в целом.

Каковы же способы объединения нейронов в сети и методы функционирования этих сетей? Если попытаться перенести на мозг закономерности, характерные для современной цифровой кибернетической техники, то следует предположить, что все межнейрональные связи подчиняются некоторой предопределенной системе, т. е. заранее детерминированы (обусловлены), а переработка информации в них происходит по заранее заданным алгоритмам — четким детерминированным инструкциям.

Однако трудно предположить, что в процессе развития организма из зародыша все сотни миллиардов соединений между нейронами возникают, четко подчиняясь предписаниям генетической информации, подобно тому как монтажник создает схему автоматической телефонной станции или электронной машины по чертежам, разработанным инженерами. Да и различия и особенности поведения отдельных животных одного и того же вида или различия в характере, способностях, темпераменте и поведении людей указывают на то, что при наличии общности структуры мозга в целом имеется огромное разнообразие в деталях, обусловливающее и различия в функционировании и в процессах обучения.

Исходя из этих соображений, можно сделать выводы о вероятностном, случайном характере связей между нейронами и о целесообразности применения вероятностных методов для описания функционирования мозга. Конечно, это не исключает наличия и закономерных, генетически предопределенных связей, играющих безусловно решающую роль в основных чертах поведения живого организма. Здесь, вероятно, можно для иллюстрации провести такую, например, аналогию с инженерными сооружениями. Когда по проекту инженера строится бетонная плотина, то предварительными расчетами устанавливается ее общая конструкция, связи и распределения нагрузок между ее отдельными крупными блоками, выбирается сорт цемента, песка, металлических конструкций и т. д. Все это элементы, которые имеют детерминированный характер.

Но никогда и никакие самые точные расчеты не могут заранее предусмотреть, как будет себя вести конкретно каждая песчинка, каждая частица бетона, каждое отдельное соединение металлического каркаса, каковы будут силы сцепления между каждой отдельной парой этих частиц множества, образующего в совокупности плотину...

Итак, разумно, по-видимому, считать, что в организации мозга сочетаются как вероятностно-статистические (в деталях), так и детерминированные (в основе) принципы. В этом кроется, очевидно, способность мозга к систематическому выполнению ряда однотипных основных функций, общих для всех индивидуумов, с одной стороны, и бесконечное разнообразие, пластичность, приспособляемость к конкретным условиям и к решению конкретных задач — с другой.

Из сказанного напрашивается вывод бионического характера о целесообразности попыток построения гибких, надежных и технологичных структур на основе использования свойств биологических сред. Такой подход вызывает в настоящее время все возрастающий интерес и реализуется практически в виде вычислительных систем

(пока в макетном исполнении) на основе сплошных однородных сред.

Один из возможных простых вариантов однородной среды представлен на рис. 24. Среда состоит из элементов, имитирующих нервные клетки, и связей, выполняющих роль отростков нервных клеток. В рассматриваемом варианте все элементы расположены в строгом порядке и каждый элемент соединен одинаковыми связями с восемью соседними элементами. При определенных условиях и характеристиках элементов и связей в подобной структуре наблюдается ряд свойств биологической среды: способность отвечать на кратковременное воздействие серией последовательных возбуждений; возможность реализации некоторых элементарных логических функций и т. д.

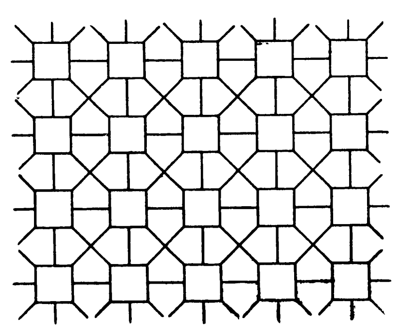


Рис. 24. Вариант структуры однородной среды.

Интенсивные теоретические и экспериментальные работы в области использования однородных сред для построения логических и вычислительных устройств развернулись за последние годы в Институте математики Сибирского отделения АН СССР и в Институте автоматики и телемеханики (технической кибернетики) АН СССР. В основу этих работ положено использование в качестве основы микроструктуры машины однородной среды, состоящей из одинаковых и одинаково замонтированных универсальных элементов, которые могут выполнять любую простейшую логическую функцию, функцию запоминания и соединяться с любым из соседних элементов.

Основными достоинствами однородных вычислительных сред, обусловливающими их перспективность при создании микроструктуры кибернетических машин, являются:

1. Высокая технологичность, связанная с массовым изготовлением однородных элементов и допустимостью некоторого процента брака благодаря возможности обходить неисправные участки схемы при ее настройке.

2. Гибкость, обусловленная возможностью настройки элементов на любые функции и, следовательно, возможностью реализации схем любой сложности и перестройки отдельных частей в процессе решения задачи.

3. Экономичность, которая достигается за счет высокого коэффициента использования элементов благодаря возможности перестройки их функций и за счет низкой стоимости даже сложных однородных элементов при их массовом производстве.

4. Высокая надежность, достигаемая возможностью автоматического ремонта схем путем исключения негодных и замены их функций другими, а также возможностью построения схем с автоматическим исправлением ошибок.

При изучении работы любой сложной системы, состоящей из большого числа элементов, очень важным является вопрос об организации взаимодействия этих элементов, локализации тех или иных

функций в отдельных группах (ансамблях) элементов, составляющих более или менее четко выраженные функциональные блоки

В отличие от четко выраженной специализации блоков вычислительных машин (память различных ступеней, арифметические и логические устройства, регистры и т. д.) запоминающие, информационные, логические, управляющие и другие функции мозга весьма трудно поддаются разделению и локализации. Неверно предполагать, что при решении человеком какой-либо задачи в его мозгу поочередно включаются в работу те или иные специализированные решающие блоки. Оказывается, что нервные процессы, которые происходят в мозгу в процессе его деятельности, как бы «разлиты» по большей части его объема, захватывают в большей или меньшей степени все его уровни и отделы.

Конечно, в мозгу могут быть выделены участки, в большей или меньшей степени ответственные за определенные функции, но наряду с этими участками в мышлении и памяти участвуют и другие области мозга, охватываемые общими диффузными процессами. При этом в мозгу не удается обнаружить высокоточных узкоспециализированных систем, которые могли бы изолированно решать какие-либо сложные математические или логические задачи, точно вычислять результаты математических операций или значения математических функций

Наличие огромного количества элементов, способных реализовать ограниченной сложности логические операции, и механизмов суммации и усреднения данных позволяет, по-видимому, мозгу работать по принципу, образно сформулированному так: «много раз плохо — это лучше, чем один раз хорошо». Использование этого принципа для создания высоконадежных кибернетических систем открывает широкое поле деятельности для конструкторской мысли инженера.

Если при решении каждой задачи мозг переключается на нее целиком, то из этого вытекает невозможность или значительная трудность выполнения им в одно и то же время более чем одного вида какой-либо сложной психической деятельности. Между тем из повседневных наблюдений известно, что человек способен к одновременному выполнению различных психических функций Так, человек может читать, в то же время слушать радиопередачу и, например, следить за играющим ребенком. Однако эта «одновременность» является, по-видимому, кажущейся. Можно предположить, что мозг человека просто способен с относительно большой скоростью циклически переключаться с одного вида деятельности на другую, задерживаться на какой-либо деятельности, если она в данный момент является важной для человека, вновь переходить на другие виды деятельности и т. д. Этот процесс аналогичен процессам в системах многократной связи с временным уплотнением или недавно разработанным методам использования высокопроизводительных вычислительных машин, работающих в режиме так называемого мультипрограммирования.

При этом способе организации работы цифровая вычислительная машина решает одновременно несколько задач. Таким образом обеспечивается более эффективное использование всей машины и ее отдельных блоков. При возникновении задержки в решении задачи, например вследствие ожидания ввода новых данных, происходит автоматическое переключение машины на решение другой задачи, а информация, относящаяся к прерванной задаче, сохраняется в па-

мяти машины. Новая задача решается также до появления какой-либо задержки или до устранения задержки в первой задаче и т. д. Эти переходы от одной задачи к другой могут совершаться как автоматически, так и по воле оператора.

Хотя методы мультипрограммирования разработаны математиками-программистами и независимо от наблюдений физиологов за работой мозга, изучение процессов переключения последнего с одного вида деятельности на другой может оказаться полезным для совершенствования методов мультипрограммирования.

Еще один интересный вопрос бионического плана, связанный с методами переработки информации в кибернетических машинах, относится к разработке алгоритмов и программ решения задач. Дело в том, что используемые в настоящее время в вычислительной технике методы переработки информации не обеспечивают возможности решения ряда весьма важных задач в приемлемые сроки даже на самых быстродействующих машинах.

В ряде случаев сейчас используется метод перебора всех возможных вариантов. Однако количество этих вариантов во многих практических задачах (опознания образов, игровых ситуациях и др.) оказывается настолько большим, что практически задача не может быть решена при самом высоком быстродействии. Например, если бы мы захотели методом перебора просмотреть все варианты шахматной партии (а число возможных сочетаний расположения фигур на шахматной доске достигает 10^{120}), то эта задача оказалась бы практически невыполнимой даже на машине с самым высоким мыслимым быстродействием. Дело в том, что, как показывают теоретические выкладки, основанные на изучении свойств материи, вычислительная машина не может обрабатывать в секунду более 10^{47} *бит* информации на каждый грамм собственного веса. Таким образом, даже машина весом в 10 *т*, т. е. 10^7 *г*, не может переработать больше 10^{54} *бит/сек* и, значит, если бы каждая ситуация шахматной партии содержала не более сотни бит информации, то время, необходимое на просмотр всех ситуаций методом перебора, составило бы $10^{120} \cdot 10^2 : 10^{54} = 10^{68}$ *сек*. Для сравнения укажем, что время, которое прошло с момента отвердения Земли, составляет всего около 10^{17} *сек*.

Приведенный пример показывает, что решение методом перебора задач исследования шахматной партии и ряда других многовариантных задач оказывается невозможным, хотя человек довольно успешно справляется с решением таких задач, располагая относительно медленно действующим вычислителем — мозгом. Достигается это тем, что человек применяет значительно более совершенные методы решения этих сложных задач, получившие название эвристических (от греческого слова «эврика» — «я нашел» — восклицания, приписываемого Архимеду при открытии им основного закона гидростатики). Эвристическим методом в педагогике называют систему обучения, при которой путем наводящих вопросов ученика заставляют самого прийти к решению поставленной проблемы.

Бионические методы совершенствования программирования кибернетических машин лежат на путях эвристического программирования. Эвристическая программа составляется на основе предварительного исследования способа решения соответствующей или сходной задачи человеком. Она включает методы человеческого мышления: выдвижение гипотезы, ее проверку и переход (в случае неудачи) к новой гипотезе и т. д. до тех пор, пока после серии догадок не будет найдено удовлетворительное решение. Эвристическая

программа не гарантирует нахождения единственного и оптимального решения, однако позволяет в результате ряда приближений за малое число шагов близко подойти к оптимальному решению.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

САМООРГАНИЗАЦИЯ И КИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Самые совершенные в настоящее время кибернетические устройства весьма далеки от человека и представителей животного мира по своим возможностям ориентировки в сложных и непредусмотренных программой ситуациях. Этот недостаток особенно существен для тех устройств, которые в процессе работы могут встречаться с различными неизвестными ранее внешними воздействиями и случайными событиями, например при исследовании глубин океанов и недр земли, космического пространства, других планет и звездных систем. Впрочем, кибернетические устройства могут столкнуться с аналогичными непредвиденными ситуациями также при управлении процессами, в которых существенную роль играют случайные обстоятельства. К таким процессам можно отнести и управление движением различных видов транспорта, и управление некоторыми технологическими процессами, и автоматическое осуществление научных экспериментов и ряд других задач.

Решение задач подобного типа техническими средствами требует создания машин, которые могли бы, во-первых, классифицировать информацию, поступающую в них из внешней среды, и, во-вторых, «самостоятельно» разрабатывать программы обработки информации, оценивать эффективность этих программ по конечным результатам и запоминать оптимальные программы для дальнейшего использования их в процессе своей деятельности.

Очевидно, что в такой машине связи между воспринимающими информацию элементами, элементами памяти, логическими и эффекторными (исполнительными) элементами не должны быть заранее жестко предопределены (детерминированы), а должны устанавливаться в результате взаимодействия с внешней средой. В машине должны образовываться внутренние связи, подобные цепям условных рефлексов, возникающих в живых организмах как результат накопления жизненного опыта.

Технические системы такого рода принято называть самоорганизующимися. Характерная особенность их заключается в самостоятельных, без вмешательства человека, местных изменениях связей, внутренней структурной перестройке, обеспечивающей приспособление к изменяющейся внешней обстановке при сохранении целостности всей системы.

Это последнее обстоятельство является существенным критерием в приведенном определении, ибо неразумно включать в понятие самоорганизации всякую перестройку, в том числе и такую, которая заканчивается взрывом, поломкой, разрушением самой системы, подобно тому, как и процесс приспособления живого организма к окружающей среде, можно считать, происходит до тех пор, пока не разрушается сам организм, не наступает смерть.

В технике автоматического управления в настоящее время довольно широко применяются некоторые типы самоорганизующихся систем. Общий признак этих систем заключается в том, что заданные значения выходных величин достигаются в них в результате автоматического поиска. При этом непременным условием эффективности поиска является наличие в таких системах обратной связи.

Особое место занимают самоорганизующиеся опознающие системы, которые будут рассмотрены подробно в следующей главе.

Особенно важное практическое значение имеют так называемые системы автоматической оптимизации, в которых автоматически устанавливается некоторое экстремальное (т. е максимальное или минимальное) значение того или иного регулируемого параметра.

Если наивыгоднейшие значения регулируемых параметров зависят от внешних воздействий, характер изменения которых заранее неизвестен, то экстремальные системы должны анализировать характер изменения входных величин и параметров системы и предсказывать их вероятные значения в будущем. Системы такого типа называют экстремальными системами с упреждением (предсказанием событий).

Рис. 25. Управляющая часть гомеостата Эшби.

Самоорганизация системы может осуществляться методом так называемого «случайного поиска», при котором результаты отыскиваются по принципу «проб и ошибок». Такие системы уже приближаются к биологическим гомеостатическим системам. Это название происходит от слова «гомеостазис», означающего совокупность сложных приспособительных реакций животного организма, устраняющих или ограничивающих влияние среды на постоянство параметров организма (температуру, кровяное давление и др.).

Одна из первых технических моделей систем подобного типа — описанный в литературе гомеостат Эшби. В простейшем варианте он представлял собой устройство, состоявшее из четырех электромагнитов с подвижными сердечниками, передвигавшими ползунки реостатов, через которые подавалось питание в обмотки электромагнитов. Положения всех элементов гомеостата взаимно связаны, так как величина тока, протекающего по обмотке любого из электромагнитов, зависит от положений всех четырех реостатов. Положения реостатов в свою очередь зависят от положений сердечников, а значит, и от величины тока в обмотке каждого электромагнита. Таким образом, гомеостат представляет собой систему, содержащую некоторое количество взаимосвязанных элементов, соединенных по принципу «каждый с каждым».

Управляющая часть гомеостата Эшби схематически показана на рис. 25. Здесь каждый из блоков A_1, A_2, A_3 и A_4 содержит электромагнит и реостаты и имеет три выхода и три входа, связывающие его с тремя прочими блоками. После включения питания начинается движение всех элементов гомеостата, которое продолжается до тех пор, пока система либо сама не находит некоторое промежуточное

устойчивое равновесное состояние, либо, если такое состояние найдено не будет, один из сердечников доходит до упора. При этом он воздействует на переключатель, производящий случайное изменение соединений в схеме, и поиски равновесия возобновляются. В конечном счете схема всегда находит некоторое промежуточное равновесное состояние (одно из большого числа возможных).

Еще более гибкая самоорганизующаяся система, принцип действия которой приближается, по мнению авторов, к работе некоторых участков головного мозга человека, была предложена в 1954 г. учеными Фэрли и Кларком.

Эта система, изображенная схематически на рис. 26, состоит из некоторого количества (в данном случае 16) элементов, имитирующих работу нейронов. Каждый нейрон может быть соединен с любыми другими нейронами так, что он может воспринимать поступающие от них сигналы и в свою очередь посылать им сигналы возбуждения. Все фактические соединения и эффективность соответствующих связей устанавливались случайно, например по жребию.

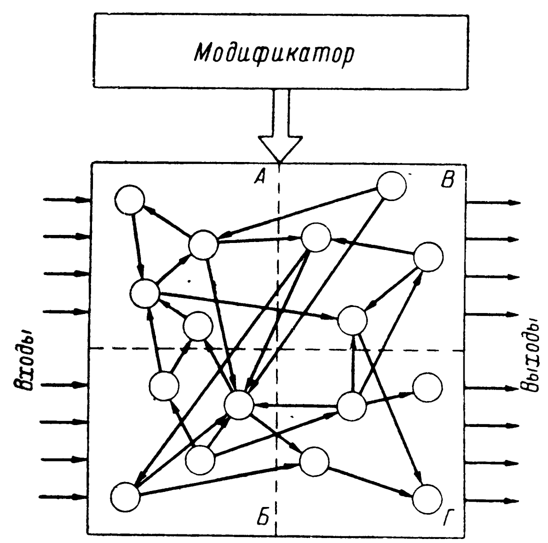


Рис 26 Модель самоорганизующейся системы (по Фэрли и Кларку).

Кроме описанной схемы, имитирующей нейронную сеть, в системе имеется модификатор — внешнее по отношению к сети устройство, которое может изменять пороги возбуждения нейронов и связи между ними.

Эксперимент самоорганизации осуществлялся в системе следующим образом. Все нейроны разделены на четыре равные группы: *А*, *Б*, *В* и *Г*. Нейроны групп *А* и *Б* могут получать сигналы со входов, а нейроны групп *В* и *Г* могут возбуждаться лишь за счет внутренних межнейронных связей и выдавать сигналы на выходы.

Внешние воздействия подаются одновременно либо на все нейроны группы *А*, либо на все нейроны группы *Б*. Перед системой ста-

вится задача: проводить возбуждение от входов группы *А* только к выходам группы *В*, а от входов группы *Б* — только к выходам группы *Г*. Для оценки качества выполнения системой этой задачи после каждого изменения ее состояния подсчитывается разность α_i между количеством правильно и неправильно возбужденных нейронов. Полученные за отдельные такты работы величины α_1, α_2... алгебраически суммируются, образуя число $N=D-\Sigma\alpha_i$, где D — некоторая наперед заданная экспериментатором величина. При идеально правильной работе системы все элементы нужной группы оказываются возбужденными, а другой группы — невозбужденными. В результате α_i имеет максимальную величину и $N(t)$, быстро изменяясь, достигает нулевого значения и меняет свой знак.

После этого произойдет автоматическое переключение входных сигналов группы *А* на группу *Б*, число $N(t)$ опять изменит свой знак, произойдет новое переключение входов и т. д. В результате $N(t)$ будет непрерывно колебаться вблизи нуля.

Если искусственно изменить $N(t)$ в любую сторону, то оно с максимальной скоростью опять вернется к нулю.

В «плохо» организованной системе убывание значения $N(t)$ может происходить весьма медленно или это значение может даже возрастать. В этом случае организация системы производится модификатором, который в зависимости от разности абсолютных величин $N(t)$ после данного такта и $N(t-1)$ после предшествующего такта работы изменяет межнейронные связи в системе.

Если разность $[N(t)-N(t-1)]<0$, т. е. отрицательна, то модификатор усиливает эти связи, а если $[N(t)-N(t-1)]>0$, т. е. положительна, то связи ослабляются. Таким образом, достигается самоорганизация системы, позволяющая выполнять поставленную ей задачу.

Работа уже организованной системы может усложняться введением в нее условного «шума», заключающегося в хаотических изменениях внутренней структуры и порогов возбуждения элементов. Однако по истечении некоторого времени под влиянием модификатора система вновь возвращается в организованное состояние.

Дальнейшая разработка и совершенствование принципов построения и работы самоорганизующихся систем подобного типа представляют несомненный интерес для техники. Таким образом, могут быть созданы сложноорганизованные действующие агрегаты, которые могли бы осуществлять поддержание заданного режима работы не только при изменении внешних (входных) воздействий, но и при изменении всей внутренней структуры, в том числе и при нарушении некоторых внутренних связей или даже при выходе из строя некоторой части активных элементов (ламп, транзисторов и др.).

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВНЫХ РЕФЛЕКСОВ, ОБУЧЕНИЕ И САМООБУЧЕНИЕ МАШИН

В основе взаимодействия между органами внутри живого организма, обеспечивающего его слаженную работу при изменяющихся условиях, а также поведения организма в окружающей среде лежат рефлексы. Рефлексами называются реакции живого организма, возникающие в виде ответа на раздражения чувствительных нервных окончаний (рецепторов). Эти реакции происходят при участии центральной нервной системы, включая ее высший отдел — кору голов-

ного мозга. Путь, по которому осуществляется рефлекс, называется рефлекторной дугой. На рис. 27 показана схема простейшей двусторонней дуги спинномозгового рефлекса. Она включает в себя рецептор *1*, чувствительный (центростремительный, афферентный) нейрон *2*, проводящий импульс раздражения от рецептора к спинномозговому нервному узлу — ганглию *3*, двигательный (центробежный, эфферентный) нейрон *4*, заканчивающийся разветвленными окончаниями *5* в двигательной мышце. Целостность рефлекторной дуги — необходимое условие осуществления рефлекса.

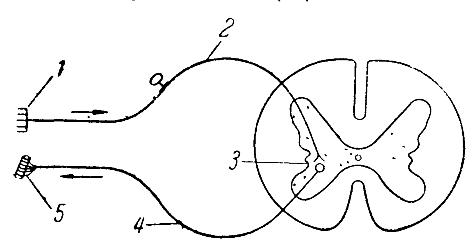


Рис 27 Схема двухнейронной рефлекторной дуги спинномозгового рефлекса

Рефлексы подразделяются на безусловные и условные. Первым соответствуют врожденные свойства нервной системы, поэтому безусловные рефлексы возникают каждый раз при достаточно сильном раздражении соответствующего рецептора. В основе безусловных рефлексов лежит жесткая, фиксированная, не изменяющаяся в нормальных условиях связь между рецептором и эффектором, осуществляющая строго определенную реакцию на определенные раздражения. Техническим функциональным аналогом безусловного рефлекса является любой автомат с жесткой программой, например автомат, отпускающий стакан воды или выбрасывающий тетрадку при опускании в него монеты.

Однако одни безусловные рефлексы, включая сложнейшую их форму — инстинкты, не могут осуществлять достаточную приспособляемость живого организма к непрерывно изменяющимся условиям внешней среды. Причина этого заключается в том, что безусловные рефлексы вызываются относительно небольшим количеством раздражителей из числа огромного количества внешних факторов, влияющих на организм.

Сложная задача приспособления организма к изменяющимся условиям существования достигается благодаря формированию на протяжении индивидуальной жизни организма условных рефлексов, глубоко изученных И. П. Павловым. Условные рефлексы возникают при совпадении во времени безразличных для организма раздражителей, вызывающих безусловный рефлекс. Физиологическая основа формирования условных рефлексов заключается в возникновении новых связей — образовании (замыкании) новых рефлекторных дуг в наиболее дифференцированных отделах центральной нервной системы. У высокоорганизованных живых организмов рефлекторные дуги условных рефлексов замыкаются в процессе выработки временных связей в коре головного мозга. Именно этот механизм образования разнообразных условных рефлексов и является физиологической

основой формирования поведения живого организма в среде, его обучения и самообучения.

В различных странах построено значительное количество технических устройств, оформленных зачастую для занимательности в виде животных и как бы моделирующих способность приобретать и накапливать «жизненный опыт», способность «обучаться». К таким моделям относятся: «клоп», «моль», предложенные Н. Винером. «мышь в лабиринте» К. Шеннона, целое поколение «черепах», построенное в Англии, СССР, США и других странах, «белка» Э. Беркли, «лисица» А. Дюкрока и др.

Рассмотрим более подробно схему и конструкцию «черепахи», машины, разработанной английским физиологом Г. Уолтером и названной им «Машина спекулятрикс» (думающая машина). Эта остроумная научная игрушка представляет собой подвижное устройство на колесиках, заключенное в корпус, напоминающий по форме утюг. Черепаха снабжена аккумуляторной батареей, двумя электродвигателями и двумя приспособлениями, играющими роль «чувствительных органов» — рецепторов. Один из рецепторов — фотоэлемент, реагирующий на источник света, а другой — специально сконструированный контакт, замыкающийся при встрече черепахи с препятствием или при движении ее по крутому скату. В передней части черепахи расположена контрольная лампочка, сигнализирующая включенное состояние и в то же время служащая как бы фарой.

Находясь в темноте, черепаха в поисках источника света движется по сложной траектории, обследуя в час несколько десятков квадратных метров поверхности. При встрече с препятствием она обходит тяжелые предметы и сталкивает со своего пути легкие. Она избегает движения по крутым уклонам и подъемам, стремясь выбирать для движения горизонтальную поверхность. При появлении в пределах «видимости» черепахи источника света она движется на него, однако если он слишком ярок, то «ослепленная» черепаха отворачивается и начинает поиски другого, умеренно яркого источника. При встрече с зеркалом черепаха как бы узнает себя и движется перед зеркалом по сложной траектории, то подходя к зеркалу, то удаляясь от него. Если выпустить одновременно несколько черепах, то при лобовом сближении они отворачиваются друг от друга, заходят сзади или сбоку и тогда реагируют одна на другую, как на обычное препятствие. При появлении постороннего источника света все черепахи направляются к нему толпой, расталкивая друг друга. Если осветить «клетку» (гараж) черепахи, то она заходит туда, причем если батарея нуждается в зарядке, черепаха подключается к источнику зарядного тока и остается неподвижной до окончания заряда, после чего отключается, «гасит» за собой свет в клетке и вновь уходит на поиски.

Приведенное описание поведения черепахи может вызвать предположение об исключительной сложности ее схемы. Однако схема ее оказывается весьма простой (рис. 28), хотя простота эта была достигнута в результате долгих и настойчивых поисков наиболее целесообразного решения задачи

В черепахе имеются две лампы (триод $Л_1$ и триод $Л_2$), электродвигатели $ЭД_1$ поступательного движения и $ЭД_2$ вращательного движения. Электродвигатели питаются от аккумуляторной батареи 6 *в* либо непосредственно, что соответствует их нормальной мощности и скорости, либо через контрольную лампочку (фару) *КЛ*, что соответствует вдвое меньшей скорости. Фотоэлемент *ФЭ* укреплен на

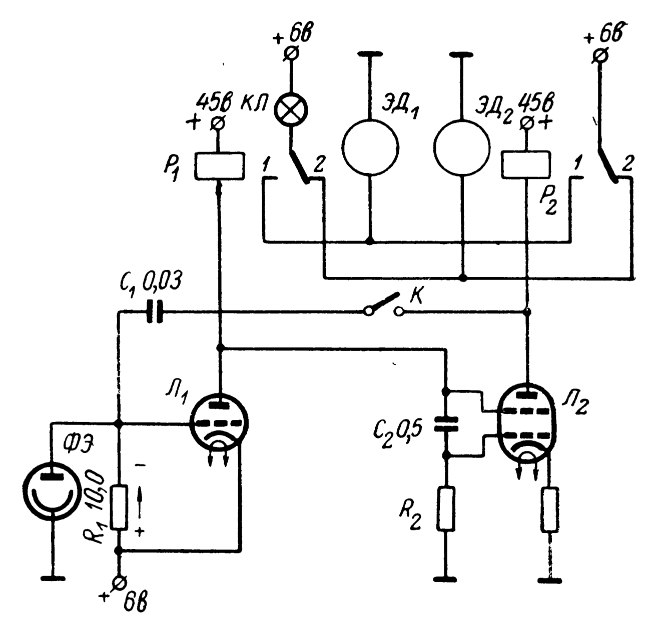


Рис 28 Принципиальная схема «черепахи»

рулевой оси ведущего переднего колеса так, что он всегда направлен в сторону движения черепахи в данный момент.

Контакт *К*, расположенный в лобовой части черепахи, состоит из металлических кольца и стержня, смонтированных в кожухе с резиновой амортизацией так, что замыкание кольца со стержнем всегда происходит как при встрече черепахи с препятствием, так и при ее сильно наклонном положении.

В анодные цепи ламп $Л_1$ и $Л_2$ включены двухпозиционные реле P_1 и P_2, срабатывающие при достаточной величине анодного тока. Сетка лампы $Л_1$ соединена с катодом через сопротивление порядка нескольких мегом, а на катод подано положительное относительно земли напряжение 6 *в*. Таким образом, при отсутствии освещенности фотоэлемента потенциал сетки относительно катода равен нулю, а при наиболее яркой освещенности он достигает максимального отрицательного значения порядка 4 *в*.

Реле P_1 удерживает якорь притянутым всегда, кроме случая яркого освещения фотоэлемента, когда вследствие большого отрицательного напряжения на сетке анодный ток снижается до малой величины. Лампа $Л_1$ и обмотка реле P_1 образуют потенциометр, с которого подается напряжение на экранирующую сетку лампы $Л_2$.

При уменьшении анодного тока лампы $Л_1$ уменьшается падение напряжения на обмотке реле P_1 и увеличивается напряжение на экранирующей сетке лампы $Л_2$. Когда фотоэлемент не освещен, это экранирующее напряжение настолько мало, что анодный ток лампы $Л_2$ недостаточен для срабатывания реле P_2. При умеренном и сильном свете оно срабатывает и замыкает контакт *1*.

Теперь можно проследить поведение черепахи в зависимости от различных внешних воздействий. В темноте якорь реле P_1 притянут и на электродвигатель $ЭД_1$ подается напряжение 6 *в* через контакт *1* этого реле и контрольную лампочку *КЛ*. Якорь реле P_2 отпущен, и электродвигатель $ЭД_2$ получает полное напряжение 6 *в*. Следовательно, черепаха будет совершать одновременно поступательное движение с половинной скоростью и вращательное движение (поиск «приманки» — источника света) с полной скоростью. В результате сложения этих двух движений она будет двигаться по такой же траектории, как точка на ободе катящегося колеса — по циклоиде. При этом, если на фотоэлемент упадет свет от источника умеренной интенсивности, увеличится отрицательное смещение на сетке лампы $Л_1$, уменьшится ее анодный ток, увеличится напряжение на экранирующей сетке лампы $Л_2$ и сработает реле P_2, причем реле P_1 будет продолжать удерживать свой якорь. Питание электродвигателя $ЭД_2$ прервется, и поиск прекратится, а на электродвигатель $ЭД_1$ будет подано полное напряжение 6 *в*, благодаря чему черепаха на полной скорости пойдет в направлении источника света. При этом лампочка *КЛ* погаснет, так как она будет шунтирована контактом *1* реле P_2.

При очень ярком (ослепляющем) свете реле P_1 отпускает, а реле P_2 продолжает удерживать якорь. Следовательно, через контакт *2* реле P_1 и лампочку *КЛ* будет подано напряжение на электродвигатель $ЭД_2$, и черепаха начнет «отворачиваться» от источника света, продолжая двигаться, так как электродвигатель $ЭД_1$ получает питание через контакт *1* реле P_2.

Если черепаха «видит» свое отражение в зеркале, т. е. если фотоэлемент воспримет отраженный зеркалом свет фары *КЛ*, то черепаха прекратит поиск и направится по прямой линии к зеркалу, как к обычному источнику света. Но так как фара при этом погаснет, а следовательно, исчезнет и отраженный свет, то черепаха начнет двигаться по циклоиде, вновь зажжет фару и будет продолжать двигаться по циклоиде, пока не «увидит» свое отражение в зеркале.

При встрече двух черепах каждая из них начинает двигаться на свет фары другой, но так как при этом фары сразу же погаснут, то дальше черепахи начнут поиск, как в темноте, т. е. разойдутся. При постороннем источнике света каждая из черепах будет стремиться к нему с потушенной фарой, а при взаимных столкновениях они будут вести себя так же, как и при столкновении с обычными препятствиями.

При столкновении с препятствием или же при сильном наклоне поверхности происходит замыкание контактом *К* цепи обратной связи между анодом лампы $Л_2$ и сеткой лампы $Л_1$. Благодаря этому образуется простейшая схема мультивибратора, состоящая из ламп $Л_1$ и $Л_2$, конденсаторов C_1 и C_2, сопротивлений R_1 и R_2 и обмоток реле P_1 и P_2. При работе мультивибратора реле P_1 и P_2 будут попеременно притягивать и отпускать свои якоря Элементы мультивибратора несимметричны и подобраны так, что время, в течение которого притянут якорь реле P_1, вдвое меньше времени притяжения якоря реле P_2.

Преодоление или обход препятствия происходит следующим образом. В течение короткого промежутка времени (срабатывание реле P_1 и отпускание реле P_2) происходит интенсивное вращение черепахи и слабое толкание, а затем в течение вдвое более длительного промежутка времени (срабатывание реле P_2 и отпускание реле P_1) — медленное вращение и интенсивное толкание и т. д. Пе-

риодичность этого процесса зависит от параметров цепи обратной связи, в которую наряду с сопротивлением R_1 входит параллельно включенный фотоэлемент *ФЭ*. Таким образом, при освещении фотоэлемента общее активное сопротивление цепи обратной связи, а значит, и постоянная времени уменьшаются, и обход препятствия при «манящем свете» происходит быстрее.

Включение света в специальной клетке привлекает черепаху так же, как и обычный источник света, но когда она попадает в клетку, происходит включение на заряд батареи, причем электродвигатели отключаются специальным реле, не показанным на схеме. В конце заряда вследствие уменьшения зарядного тока реле отпускает, включаются электродвигатели, в клетке автоматически гаснет свет и черепаха вновь выходит на поиски «приманки».

Описанная схема моделирует ряд безусловных рефлексов, механизм которых обусловлен неизменной конструкцией и схемой черепахи. Дальнейшее усложнение ее схемы позволило моделировать процессы формирования условных рефлексов. При этом в качестве безусловного раздражителя использовался свет, воспринимавшийся фотоэлементом, а в качестве условного сопутствующего раздражителя — звук, воспринимавшийся микрофоном.

Такая модель ведет себя следующим образом. Она всегда приходит в движение под действием света и движется при одновременном воздействии света и звука, но никак не реагирует на один только звук. Однако если повторить, скажем, десять опытов, одновременно «показывая» черепахе свет и издавая звук, то после этого черепаха будет приходить в движение уже и при одном звуке. Но если затем в течение определенного времени или определенного количества опытов не подкреплять звуком свет, то образовавшаяся временная связь исчезнет, «условный» рефлекс угаснет, подобно тому как если только показывать собаке свет, не подкрепляя этот условный раздражитель пищей, то ранее выработанный по И. П. Павлову условный рефлекс на свет у нее угаснет и реакция в виде отделения слюны при показе света прекратится.

Не рассматривая подробно принципиальную схему этой модели, ограничимся описанием упрощенной скелетной схемы (рис. 29), по которой можно составить общее представление о принципе моделирования условного рефлекса.

Рецепторами модели служат фотоэлемент *ФЭ* и микрофон *М*, напряжения от которых подводятся к усилителям $У_1$ и $У_2$. На выходе усилителей включены реле P_1 и реле P_2 так, что при срабатывании любого из них замыкается цепь питания электродвигателя *ЭД*. При освещении фотоэлемента в результате усиления фототоков усилителем $У_1$ срабатывает реле P_1 и черепаха начинает двигаться. Однако при появлении звука черепаха остается неподвижной, так как усилитель $У_2$ нормально не работает, вследствие того что на сетки его ламп подано запирающее отрицательное смещение.

При одновременном воздействии света и звука черепаха тоже приходит в движение благодаря срабатыванию реле P_1. Однако при этом токи от фотоэлемента и микрофона поступают также в схему совпадения *СС*, которая в результате каждого случая совпадения света и звука выдает импульс тока в накопительное устройство *НУ* памяти, например постепенно заряжающийся конденсатор. Когда в результате, скажем, десятикратного повторения совпадений света и звука напряжение на конденсаторе достигнет определенной величины, оно отопрет лампу усилителя $У_2$, после чего черепаху можно

считать «натренированной»: реле P_2 будет срабатывать при воздействии одного только звука, и черепаха будет приходить в движение.

В схему можно ввести дополнительное реле, которое через большое сопротивление каждый раз при наличии только звука будет несколько разряжать конденсатор. Таким образом, после нескольких случаев движения черепахи от звука (условного раздражителя) без подкрепления светом (безусловным раздражителем) образовавшаяся временная связь разрушится и черепаха перестанет реагировать на один только звук.

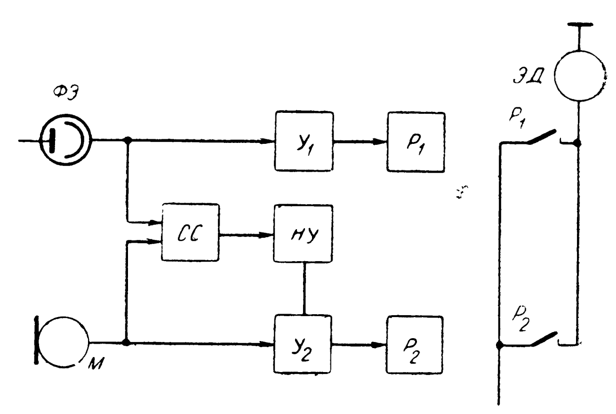


Рис 29 Скелетная схема моделирования условного рефлекса.

Конечно, механизмы образования условных рефлексов в живых организмах неизмеримо более сложны и гибки, но инженеры могут разработать и предложить физиологам более сложные и более совершенные схемы, из которых можно выбрать схемы, наиболее соответствующие реальным процессам в живом организме.

Описанная черепаха, как и другие ранее создававшиеся устройства, моделирует рефлексы, заранее предопределенные конструктором. Однако более совершенный автомат должен характеризоваться известной «свободой обучения», т. е. он должен обладать возможностью выбора той или иной нужной связи из некоторого множества связей, допускаемых его схемой.

Модель подобного автомата, разработанная в Институте психиатрии АМН СССР, представлена матрицей (рис. 30), состоящей из так называемых «центральных» нервных клеток. Каждая такая клетка имеет три входа и один выход, на котором возникает сигнал возбуждения, если произошло несколько одновременных возбуждений всех трех входов.

Входы P_1, P_2, ..., P_n имитируют рецепторные нейроны, возбуждаемые под влиянием внешних раздражителей. Сигналы на входах $Э_1$, $Э_2$, ..., $Э_m$ соответствуют возбуждению эффекторных нейронов. Наконец, на вход *П* подается сигнал подкрепления, фиксирующий в схеме случайные связи, если они оказываются «полезными» для функционирования системы. В лабораторном макете подобного устройства критерий полезности определяется оператором.

Процесс обучения автомата происходит следующим образом. На рецепторные входы матрицы подаются сигналы раздражения, и в то же самое время блок случайных действий, имитирующий срабатывание эффекторных нейронов, поочередно подает через замкнутые контакты K_1, K_2, ..., K_m сигналы возбуждения на шины $Э_1$, $Э_2$, ..., $Э_m$. Наконец, в некоторые моменты времени подаются сигналы подкрепления, поступающие на все центральные клетки матрицы. Очевидно, что в каждый данный момент времени возбуждение

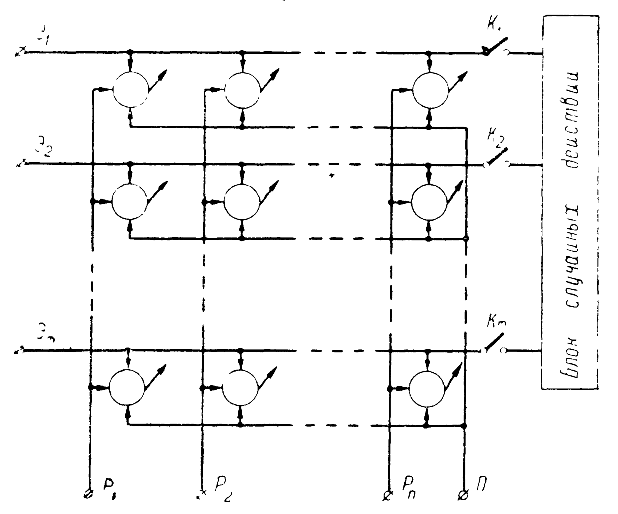


Рис 30 Блок-схема обучающейся матрицы из центральных нейронов

поступит на все три входа лишь какой-то одной из клеток В результате нескольких подобных случайных возбуждений одной и той же центральной клетки происходит понижение порога ее срабатывания, обеспечивающее ее возбуждение при поступлении только одного сигнала раздражения. Это и соответствует выработке условного рефлекса, механизм которого оказывается локализованным в данной клетке.

Дальнейшее обучение позволяет выработать (на те же или другие раздражения) другие условные рефлексы, механизмы которых будут локализованы в других центральных клетках. После окончания обучения схемы блок случайных действий отключается от нее путем размыкания контактов K_1, K_2, ..., K_m, но образовавшиеся условные рефлексы продолжают определять действие автомата. Схема центральных клеток может быть построена таким образом, что возникшее в ней возбуждение на выходе сохраняется лишь при условии периодического подкрепления соответствующих входных возбуждений.

Более сложная задача состоит в моделировании рефлексов, когда прежде всего должен быть выработан условный рефлекс на некоторое раздражение P_i, подкрепляемое сигналом $П$, затем на раздражение P_k, подкрепляемое раздражением P_i, затем на раздражение P_l, подкрепляемое раздражением P_k, и т. д. В подобной си-

стеме необходимо реализовать процессы различения раздражений во времени, что позволяет создавать автоматы, моделирующие ряд логически-последовательных операций, направленных к достижению некоторой полезной цели.

Разработка принципиальных схем центральных нервных клеток и отдельных узлов такого автомата, а также постройка самого автомата, реагирующего на четыре внешних раздражителя, были осуществлены студенческим конструкторским бюро кибернетики Московского энергетического института.

Автомат представляет собой устройство, построенное на 100 электронных лампах, полупроводниковых диодах и электромеханических реле. Автомат демонстрировался в действии на ВДНХ.

Дальнейшие разработки и совершенствование могут привести к созданию кибернетических машин такого типа, которые будут подобно живому организму в процессе работы вырабатывать для себя программу действий в виде цепи условных рефлексов, осуществляющей наилучший способ достижения поставленной перед ними конечной цели. Такие самоорганизующиеся системы могут оказаться особенно полезными для управления некоторыми малоизученными производственными процессами, устройствами для космических исследований и т. п.

НАДЕЖНОСТЬ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Непрерывное расширение диапазона задач, поручаемых кибернетическим машинам, связано с усложнением этих машин и быстрым увеличением количества их элементов. Это в свою очередь значительно усложняет создание достаточно надежных кибернетических систем.

Согласно одному из многочисленных определений надежностью устройства называют вероятность того, что в заданном интервале времени не произойдет ни одного отказа в работе.

При обычном принципе построения электронных схем они прекращают работать при выходе из строя хотя бы одного существенного элемента: лампы, транзистора, трансформатора, конденсатора и др. Пусть каждый из n видов элементов, входящих в данное устройство, характеризуется вероятностью q_i безотказной работы в течение некоторого заданного срока. Пусть далее количество элементов каждого вида в устройстве равно m_i. Тогда надежность, т. е. вероятность Q исправной работы всего устройства в целом в течение этого срока, определится произведением:

$$Q = q_1^{m_1} q_2^{m_2} \cdots q_n^{m_n} .$$

Легко показать, что с увеличением количества элементов при неизменной величине их надежности надежность всего устройства может стать настолько малой, что его использование будет практически нецелесообразным.

Если первые радиоэлектронные схемы содержали несколько штук или максимум несколько десятков ламп, то сейчас количество ламп или транзисторов в них уже достигает тысяч и десятков тысяч. Например, цифровая вычислительная машина БЭСМ имеет 5 000 ламп, а вычислительная машина AN/FSQ-7, построенная фирмой ИБМ (США) для работы в системе противовоздушной обороны, содержит около 58 000 ламп.

Кроме того, на каждую лампу или транзистор в электронных схемах приходится по нескольку конденсаторов и сопротивлений. Наконец, оперативные запоминающие устройства современных машин зачастую содержат сотни тысяч и даже миллионы запоминающих элементов — ферритовых сердечников.

Если даже пренебречь возможностью выхода из строя всех прочих деталей и считаться только с отказами в работе из-за неисправностей ламп и далее задаться вероятностью надежной работы лампы в течение 1 000 *ч* ($q=0{,}999$), то надежность кибернетической машины, содержащей 58 000 ламп, будет, очевидно, равна $Q=0{,}999^{58\,000}\approx\approx10^{-23}$. Таким образом, практически представляется совершенно невероятным, чтобы эта машина могла безотказно проработать 100 или хотя бы 10 *ч* без применения каких-либо дополнительных мер. В частности, в упомянутой машине все основные блоки: запоминающее, арифметическое и выводное устройства — полностью дублированы. Однако подобное дублирование устройств или отдельных крупных блоков — отнюдь не наилучшее решение задачи. В самом деле, если каждый из дублирующих друг друга блоков содержит очень большое количество деталей, причем выход из строя одной из деталей выводит из строя весь блок, то даже несколько взаимно дублирующих блоков не обеспечат надежности работы всего устройства в целом.

Между тем в центральной нервной системе живых организмов, состоящей из миллиардов нейронов, выход из строя целых участков системы, включающих многие тысячи нейронов, часто не нарушает или приводит лишь к временному ухудшению соответствующей функции, которая затем восстанавливается. Можно указать, например, на опыты Лешли с ориентировкой крыс в лабиринте. При этих опытах удаление у крыс значительной части мозгового вещества лишь частично нарушало способность животных к ориентировке. Причина восстановления функций заключается, как правило, не в регенерации нервного вещества, а в выработке функции заново в сохранившихся участках нервных структур.

Такое свойство нервной системы, очевидно, может достигаться только в результате значительных резервных возможностей живых организмов, так называемой избыточности их организации. Конструктивная и функциональная избыточность живых организмов обеспечивает возможность их самоорганизации в процессе обучения и достаточную надежность системы.

Следует при этом подчеркнуть, что каждый отдельно взятый нейрон представляет собой элемент, характеризующийся при выполнении простейшей триггерной функции значительно меньшей надежностью, чем, скажем, электромеханическое реле, лампа или транзистор. По некоторым подсчетам за час человеческой жизни отмирает около 1 000 нейронов (это число не слишком велико, если его сравнить с общим числом нейронов мозга — более 10^{10}). После отмирания нейрон уже не восстанавливается. Таким образом, человек с нормальной продолжительностью жизни теряет за весь этот период до 10^9 нейронов, и все же мозг его продолжает эффективно работать.

Уже в ранних работах по кибернетике в явном виде обозначился бионический подход к обеспечению надежности. Заслугой кибернетики является, в частности, то обстоятельство, что впервые в истории науки и техники было принято в качестве постулата, что кибернетическая система принципиально не может быть построена из абсолютно надежных элементов и что к высокой надежности отдельных

элементов можно не стремиться, если это достигается не слишком дешевой ценой. В кибернетике постулируется, что отказы, сбои, ошибки органически присущи элементам машины (автомата), и задача создания машины предполагает не столько выбор надежных элементов, сколько построение схемы, значительно более надежной, чем каждый из ее элементов.

Уже в первых работах по созданию надежных кибернетических систем в качестве элементов широко использовались технические модели нейронов. Сами системы (нервные сети) могут предназначаться для решения различных задач. Это определяется структурой системы и устройствами ввода и вывода. Моделирование нейронных систем важно потому, что таким образом моделируются высшие функции мозга — опознание, принятие решений, логическое исчисление высказываний. Не менее важно и то, что моделирование нейронных систем существенно развивает теорию надежности. В полном соответствии с данными нейрофизиологии о малой надежности нейронов и необычайно высокой надежности нервной системы в целом для построения бионических систем выбираются нейроноподобные элементы. Они достаточно надежны в работе. В то же время сложная нейронная структура благодаря исключительно целесообразной избыточности организации, выражающейся в множественности резервных элементов и связей между ними, может в целом действовать с весьма высокой степенью надежности.

Таким образом, живые организмы представляют собой высоконадежные кибернетические системы, построенные из малонадежных элементов Начало математической разработки проблем создания подобных систем было положено крупнейшим математиком Дж. Нейманом. Он показал, что, комбинируя определенным образом ненадежные логические элементы типа «штриха Шеффера» (см гл. 1), можно получить схему, действующую, как штрих Шеффера высокой надежности

Для этой цели можно использовать в схемах дополнительные (избыточные) элементы, так что вероятность искажения заданной функции окажется незначительной, несмотря на случайные отказы отдельных элементов Избыточные элементы включают в себя как «исполнительные» органы, выполняющие некоторые логические функции и функции задержки, так и специальные «восстанавливающие» органы, способствующие устранению возникающих неисправностей.

Передача информации внутри описанной Нейманом системы происходит по пучкам дублирующих друг друга цепей. При этом система организуется так, что причиной несрабатывания всего устройства может быть лишь несрабатывание большого числа элементов, а не отдельного элемента или небольшого количества их. При достаточно большом количестве элементов и линий в каждом пучке вероятность несрабатывания устройства может быть принципиально сделана сколь угодной малой.

Дальнейшее развитие идей Неймана привело к разработке теории надежных систем из ненадежных реле. Метод Неймана был применим лишь при определенной, достаточно высокой надежности логических элементов (при возможности ошибки не более $^1/_6$). Позднее были разработаны вопросы теории надежных схем из ненадежных реле, которые позволяют в принципе создавать схемы с любой заданной надежностью из элементов с любой вероятностью ошибки. Естественно, что для этого необходимо повышение количества элементов, т. е. увеличение избыточности конструкции.

Важнейший фактор устойчивости и надежности структур живых организмов заключается также в их непрерывном обновлении благодаря процессам обмена веществ, вследствие чего происходят постоянное разрушение и созидание. Современная наука и техника еще весьма далеки от создания подобных искусственных самообновляющихся устройств.

Для практической реализации многократной избыточности необходима разработка достаточно миниатюрных и экономичных элементов релейного типа. Применение принципов избыточности организации, свойственных живым организмам, при использовании достижений микроминиатюризации элементов и схем позволит создавать новые исключительно гибкие и надежные кибернетические системы, прототипом которых могут служить нервная система и ее совершеннейший орган — человеческий мозг.

ГЛАВА ПЯТАЯ
АНАЛИЗАТОРЫ И ПЕРЦЕПТРОНЫ

АНАЛИЗАТОРЫ ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА

Анализаторы, или органы чувств, представляют собой органы живого организма, предназначенные для восприятия из окружающей среды разнообразной информации с целью анализа внешней обстановки. Эти органы, по определению Ленина, служат как бы «окнами», через которые внешний мир проникает в сознание человека.

Классическое представление об органах чувств, восходящее еще к эпохе древнегреческой культуры, различает пять основных видов чувств: зрение, слух, обоняние, осязание и вкус. При этом важнейший для человека орган чувств — зрительный анализатор. Через него, как показали исследования, человек воспринимает до 80—85% всей внешней информации.

Современная классификация более дифференцирована и различает такие ощущения, как, например, чувство боли, тепла, холода, равновесия, перемещения в пространстве, голода, жажды и др.

Анализаторы представляют собой трехзвенные системы, включающие следующие три ступени. Первое звено анализаторной цепи — приемник или рецептор, обращенный к внешней (иногда и к внутренней) среде и предназначенный для приема сигналов-раздражителей и переработки (перекодирования) этих сигналов в нервные импульсы. Вторым звеном анализатора является нервный пучок, предназначенный для проведения нервных импульсов рецептора. Третье звено — мозговой центр, в котором происходит окончательная переработка воспринятых сигналов и принятие решений.

В качестве примера наиболее важного для человека анализатора рассмотрим зрительный анализатор (рис. 31). Рецептором зрительных ощущений служит глаз или, точнее, специальные чувствительные клетки (фоторецепторы) его сетчатки. Общее количество этих клеток у человека составляет около 130 млн., из них так называемых палочек — около 120 млн. и колбочек — около 10 млн. Другие части глаза (зрачок, хрусталик, мышцы и др.) служат лишь вспомогательными органами оптической системы. Они обеспечивают преломление, фокусировку и диафрагмирование для получения резкого изображения на сетчатке.

В рецепторных клетках под действием света возникает возбуждение, которое по нервным волокнам передается мозговому или центральному концу зрительного анализатора, расположенному в коре затылочной доли мозга. Общее количество волокон в зрительном нерве около 1 млн., т. е. в среднем одно волокно проводит возбуждения от 130 фоторецепторов.

Отметим некоторые интересные, с точки зрения инженера, свойства и характеристики зрительного анализатора человека.

Прежде всего поражает колоссальный диапазон чувствительности сетчатки. Энергия, достаточная для получения светового ощущения, составляет 5—14 квантов. Следовательно, чувствительность зритель-

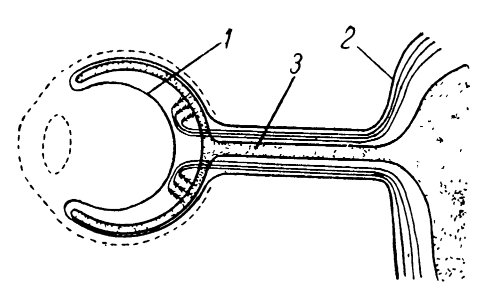


Рис 31. Схематическое изображение зрительного анализатора.
1 — сетчатка; *2* — мозг; *3* — зрительный нерв.

ного анализатора доведена почти до возможного предела, если учесть, что минимально возможное количество световой энергии равно 1 кванту. С другой стороны, глаз способен выдерживать воздействие и весьма больших световых потоков, как, например, при взгляде на солнце или на дугу электросварки.

Важное свойство органа зрения, обусловливающее расширение его информационных возможностей, заключается в его способности к различению длин волн световых колебаний в диапазоне от 350 до 850 *ммк*. Субъективно световые колебания разных частот воспринимаются человеком как различные цвета, причем природа механизма цветового зрения до сих пор еще не получила удовлетворительного объяснения.

Глаз человека охватывает весьма большое поле зрения, т. е. он представляет собой широкоугольную оптическую систему. Однако ясность видения в различных частях видимого поля весьма различна. Мы плохо видим элементы изображения, расположенные по краям этого поля, и наиболее четко — расположенные посредине поля, проектирующиеся на так называемую центральную ямку сетчатки. Центральная ямка имеет диаметр около 1,4 *мм*, что соответствует углу зрения около 1,3°. Для наглядности представления укажем, что конус с таким углом у вершины при высоте 1 *м* будет иметь основание в виде круга диаметром около 2 *см*.

Таким образом, большая часть сетчатки используется в глазу человека лишь для общей ориентировки, а для ясного видения глаз должен быть направлен на рассматриваемые детали изображения так, чтобы они попали в зону, заключающуюся в пределах очень узкого угла зрения.

Как уже указывалось ранее, для глаза характерно явление адаптации, т. е. привыкания к статичному раздражению. При этом видение неподвижных предметов обеспечивается мелкими колебательными движениями глаза, которые происходят непрерывно даже в те моменты, когда наблюдатель стремится фиксировать взгляд в какой-либо неподвижной точке. Частоты этих колебаний находятся в пределах от 1 до 150 *гц*.

Такие движения глаза происходят по всем направлениям, и благодаря им глазом выделяются те участки изображения, которые содержат основную информацию о рассматриваемом объекте.

Кроме того, при рассматривании крупных объектов оба глаза строго синхронно совершают с большой угловой скоростью (до 400° в секунду) еще скачки от одной точки изображения к другой. При этом, если пренебречь мелкими движениями, время рассматривания объекта распределяется следующим образом. На скачки затрачивается около 3% всего времени, а остальные 97% взгляд оказывается фиксированным на тех или иных наиболее ярких и важных элементах изображения.

При рассматривании движущихся объектов глаза передвигаются с угловой скоростью, равной угловой скорости движения объекта относительно наблюдателя. Такое непрерывное во времени слежение за объектом перемежается периодическими скачкообразными движениями глаз, имеющими своей целью корректировку ошибок слежения.

Пропускную способность зрительного анализатора человека на основании многочисленных опытов можно оценить величиной порядка 10—50 *бит/сек.*

Не вдаваясь в дальнейшие подробности сложнейшего механизма восприятия зрительных образов, отметим лишь, что система зрительного анализатора очень хорошо приспособлена для восприятия, передачи и переработки информации. В ней используются методы дискретного двоичного кодирования информации, что обеспечивает высокую помехоустойчивость. Для обнаружения сигналов в зрительной системе используются статистические методы, которые только начинают применяться в настоящее время в наиболее совершенных технических системах передачи информации.

Другим весьма важным органом восприятия информации у животных и человека служит слуховой анализатор.

Частотный диапазон слухового анализатора человека заключается в пределах от 16 до 13 000 *гц* (у пожилого человека) и до 22 000 *гц* (у ребенка). Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в области частот 1 000—4 000 *гц*.

Об исключительно высокой чувствительности слухового анализатора можно судить по следующим цифрам. Люди с острым слухом воспринимают звук при величине звукового давления в слуховом проходе около 0,0001 *дин/см²*. Такому давлению соответствует перемещение элементов улитки уха на величину порядка 10^{-11} *см* (в 1 000 раз меньше диаметра атома водорода).

В то же время слуховое восприятие оказывается еще возможным и при увеличении звукового давления до 2 000 *дин/см²*, когда возникает болевой порог.

Различительная способность человеческого уха также весьма велика. Так, люди с хорошо развитым слухом могут отличить тон в 1 000 *гц* от тона 1 001 *гц*.

Важное свойство слухового анализатора заключается в так называемом бинауральном эффекте, заключающемся в способности человека с точностью до 2—3° определять направление приходящего звука. Это свойство обусловлено разностью интенсивности и фазы звуковых волн, достигающих обоих ушей.

В животном мире анализ звуковых сигналов часто имеет большее значение, чем анализ всех других сигналов. Так, например, у летучих мышей зрительный анализатор полностью атрофировался, но зато слуховой анализатор получил такое развитие, что, наблюдая за поведением летучих мышей, исследователи склоняются к мысли о своего рода «видении» окружающего пространства в звуковых картинах. Для получения звукового образа внешней ситуации летучая мышь излучает звуковую (точнее — ультразвуковую) посылку.

Встречая препятствия, звуковой луч отражается от них и возвращается в виде эхо-сигналов на рецепторное устройство этого своеобразного живого локатора. При этом летучая мышь обнаруживает препятствия в виде проволоки диаметром около 1 *мм* и менее. Был проделан физический расчет, который показал, насколько ничтожна энергия эхо-сигнала, отраженного от столь малоприметных препятствий. Но все же оказывается, что эти слабые сигналы несут летучей мыши существенную информацию. Ведь, помимо обнаружения препятствий, таким же способом осуществляется обнаружение и опознание добычи (комаров, мошек, ночных бабочек и других насекомых). Этот механизм опознания объектов по отраженным эхо-сигналам давно привлекает самое пристальное внимание инженеров, которые надеются использовать его в радиолокации и гидроакустике для опознания целей.

Еще одним подтверждением высокой эффективности слухового анализатора летучей мыши служит следующий факт. Целиком полагаясь на звуковую локацию и слух, летучая мышь в ходе эволюции необычайно развила память на сложные образы. Так, в мозгу летучей мыши может быть запечатлен сложный путь в лабиринте, который она должна пролететь, возвращаясь в гнездо после охоты. В ряде экспериментов делалось следующее. Расставляя на пути летучей мыши к гнезду различные препятствия, ожидали некоторое время, пока хозяйка гнезда освоит новый путь к себе домой и запомнит его. По истечении некоторого времени все препятствия на пути в гнездо убирали, так что мышь свободно могла лететь к гнезду по прямой линии. Но оказывалось, что, подлетая к знакомым местам, летучая мышь выключает свой локатор и, целиком полагаясь на память (слуховую память!), совершает довольно замысловатую траекторию в свободном пространстве перед гнездом. Сложность траектории, длительность запоминания и сам факт, что летучая мышь так смело полагается на свою память, служат доказательством, что слуховая память у нее очень хорошо развита. И только если на проверенном пути поставить препятствие, летучая мышь, натолкнувшись на него, как бы спохватывается и немедленно включает свой локатор, зондируя пространство и ловко маневрируя среди неожиданно возникших преград.

Не менее эффективен слух у многих китообразных, в том числе у дельфинов. Вода прозрачна для зрения только на очень небольших дистанциях. Пределы видимости в воде изменяются от района к району и составляют величину от нескольких метров до нескольких десятков метров. Обитателям морей, особенно крупным хищникам, таким, как дельфины, необходимо обозревать окружающее простран-

ство на значительно больших расстояниях. Для этого им с успехом служат звук и ультразвук. Для звуковых лучей вода «прозрачна» на значительных расстояниях. Поэтому дальность действия звуковых локаторов в зависимости от частоты и мощности излучения составляет у дельфинов величину от десятков и сотен метров до нескольких километров. По дальности действия технические акустические станции намного превосходят все то, что можно наблюдать у водных животных. Но дельфины, например, обладают неразгаданными способностями как бы видеть в воде, лоцируя водное пространство ультразвуковыми посылками. Во всяком случае, опубликованы многочисленные результаты экспериментальных исследований, при которых дельфины, помещенные в небольшой бассейн, безошибочно определяли на расстоянии в несколько метров вид рыбы, которая им предлагалась. Они подплывают к съедобным приманкам и игнорируют появление рыбки тех же размеров, но другого вида, который они не употребляют в пищу. В это же самое время точная контрольно-измерительная аппаратура регистрировала хаос звуков, отражаемых от стен бассейна, от дна, от поверхности, от водорослей, от сетей и других всевозможных препятствий. У наблюдателей складывалось полное впечатление, что ничтожное по количеству энергии эхо от маленькой рыбки полностью теряется на уровне значительных шумов и посторонних отражений. В довершение ко всему тело рыбы прозрачно для звуковых лучей (в нашем понимании физики явлений), и отражение происходит только от маленького плавательного пузыря, заполненного воздухом.

По некоторым данным, дельфины обнаруживают рыб на расстоянии в 3—5 *км*. Возможно, что это несколько завышенная оценка возможностей биологического эхо-локатора, но многочисленные эксперименты в бассейнах разных стран статистически достоверно доказывают очень высокие показатели работы локаторов дельфинов в режимах поиска, обнаружения и классификации различных объектов под водой.

Некоторые исследователи считают, что звуковая и ультразвуковая локация распространена в мире водных животных много шире, чем это нам сегодня представляется. Предполагают, что такого рода локаторами обладают некоторые виды рыб.

Можно ожидать, что активное прослушивание водной среды с помощью локаторов требует участия довольно сложных механизмов. Их познание в ходе бионических исследований встретит большие трудности, но работы в этом направлении уже ведутся, так как подводные лодки, научно-исследовательские и промысловые суда нуждаются в надежных гидролокаторах, позволяющих обозревать водное пространство с большим радиусом действия.

Наряду с активным (локационным) звуковым прослушиванием в животном мире существуют относительно простые анализаторы пассивного звукового восприятия. Некоторые из них сравнительно давно привлекли внимание исследователей и даже нашли бионическое воплощение в технических системах. Так, например, в свое время было обнаружено, что слуховой анализатор медуз способен воспринимать инфразвуковые колебания, возникающие во впадинах штормовых волн и распространяющиеся на большие расстояния со скоростью, превышающей скорость приближения шторма. Это позволяет медузам услышать предупреждающий «голос моря» за несколько часов до наступления штормовой погоды. Медузы отплывают от береговой кромки, где им грозит опасность разбиться во время штор-

ма, и погружаются на безопасную глубину. Ученые-биологи Московского университета совместно с инженерами провели ряд исследований, в результате которых удалось сконструировать прибор для прогноза штормовой погоды. Принцип действия прибора не только подсказан живой природой, но и в значительной степени соответствует слуховому анализатору медузы.

О слуховых анализаторах животных и человека можно было бы рассказать еще очень много интересного. Но ведь существуют и другие анализаторы. Близко к слуховому стоит осязательное восприятие. Оно очень широко развито в животном мире (у насекомых, водных животных, птиц). Давно известно, что некоторые люди, профессия которых заставляет широко использовать осязание, добиваются больших успехов, определяя на ощупь качество и сорт ткани, качество помола муки и т. д. Осязательный анализатор привлекает особенно большое внимание исследователей в тех случаях, когда объектом бионического исследования является человек, входящий в систему «человек—машина». Перегруженность основных анализаторов (зрительного и слухового) заставляет искать другие возможности ввода информации. Оказывается, что осязательная информация пригодна для уведомления оператора об аварийных режимах. Кроме того, могут быть сформированы довольно сложные пространственно-временные образы, эффективно воспринимаемые осязательным анализатором подобно тому, как это происходит в органе зрения, только раздражителями выступают механические воздействия на кожу человека. Разрешающая способность осязания значительно ниже, чем зрения. В целом осязательные анализаторы исследованы пока еще крайне поверхностно.

Еще более скромны теоретические и практические успехи бионики в исследовании вкусового и обонятельного анализатора, о важности которых много говорилось в первой главе при обсуждении механизмов хеморецепции в животном мире.

Чисто биологические и бионические исследования последних лет достоверно показали, что наряду с широкоизвестными пятью органами чувств в живой природе существует большое число механизмов восприятия, в которых сигнальную нагрузку несут самые различные виды энергии — от тепловых излучений до электромагнитных полей. «Патентные кладовые» природы исследованы еще далеко не до конца, но уже сегодня простой перечень разных анализаторов, служащих различным животным для восприятия информации о состояниях внешней среды и о внутренних состояниях организма, занял бы слишком много места и времени. Многие из них могут и должны получить то или иное бионическое воплощение в технических системах сбора, поиска и оценки сигналов. Основной круг вопросов этого плана образует ту проблему, которую в бионике и кибернетике принято называть проблемой обнаружения и опознания сигналов (или образов).

Не останавливаясь на работе прочих органов чувств, представляющих собой также весьма сложные и тонкие системы, уже из сказанного об анализаторах зрения и слуха можно сделать вывод об их исключительно высокой организации. Напомним еще об интереснейших способах ориентировки перелетных птиц, мигрирующих рыб, пчел и др.

Поэтому вполне естественно стремление ученых наделить кибернетические машины, в которых реализуются сложнейшие программы переработки информации, значительно более гибкими и совершен-

ными устройствами для восприятия информации из внешней среды, хотя бы в некоторой степени сравнимыми по своим способностям к распознаванию с анализаторами высших животных и человека

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОПОЗНАНИЕ СИГНАЛОВ

Одновременно с возникновением радиотехники и гидроакустики перед инженерами и учеными стала проблема помех, проблема обнаружения сигналов заданной сложной формы. Задачи этого круга более или менее успешно решались в рамках общей теории связи. Дальнейшее усложнение сигналов поставило проблему обнаружения с распознаванием. Процедуры обнаружения с распознаванием в ряде случаев довольно эффективно реализуются в радиоприемных трактах каналов связи. С появлением и широким развитием радиолокации и гидролокации ситуация усложнилась, так как возникшие одновременно задачи опознания объектов, лоцируемых по форме отраженного от них эхо-сигнала, уже не являлись специфическими задачами общей теории связи. Их решение потребовало привлечения средств вычислительной техники, логико-информационной обработки принятых сигналов, разработки специальных алгоритмов. К этому же времени стала актуальной в общем-то довольно давняя задача создания читающих машин, а также устройств для ввода в машину звуков речи. В отличие от радиотехнических задач обнаружения с распознаванием в задачах опознания печатных и рукописных символов оказалось сложно и нецелесообразно использовать приемы и методы спектрального анализа и фильтрации опознаваемых сигналов (в данном случае сигналов в виде светового потока, отраженного от листа, на котором написаны буквы или цифры). Использование методов корреляционного анализа, основанного на выяснении степени схожести различных символов, оказалось более плодотворным, но требовало создания громоздкой, негибкой аппаратуры. Первые попытки использования программируемых цифровых вычислительных машин также не обнадеживали. При быстродействии машины более 10^3 операций в секунду первые программы позволяли опознать букву за время, исчислявшееся несколькими секундами. Такое медленное «чтение» текста быстродействующими машинами само по себе не могло не привлечь внимание кибернетиков. Очень скоро выяснилось, что объяснить медлительность быстродействующих машин нетрудно, так как существует слишком много вариантов написания каждого символа, и все эти возможные варианты пытались учитывать в первых алгоритмах опознания печатных и рукописных знаков (впрочем, с машинным опознаванием рукописных знаков вначале вообще почти ничего не получалось). Много труднее оказалось дать рекомендации о том, как построить алгоритм опознания букв, который позволял бы машине считывать символы так же быстро, как это делает человек, или еще быстрее — со скоростью в десятки и сотни символов в 1 *сек*

Одновременно с исследованиями проблем машинного «чтения» символов проводились работы по опознанию звуков речи с помощью электронных вычислительных машин, приведшие к не менее обескураживающим результатам. Оказалось, что машина не в состоянии выделить какие-либо звуки речи в качестве основных единиц. Детальный анализ помог найти причину: те звуки, которые человек на слух воспринимал как основные единицы, позволяющие построить любое слово, физически оказались плохими эталонами. На них сильно воздействовали соседи по слову — гласные и согласные. В итоге,

казалось бы, разные звуки алфавита «а» и «о» в некоторых словах оказывались физически идентичными, а один и тот же (как хочется считать) звук «и» физически варьирует в широчайшем диапазоне в зависимости от соседства разных других звуков слова, от диктора (мужчина или женщина), от тона и громкости говорящего и от других факторов.

К 50-м годам нашего столетия проблема обнаружения и опознания сигналов становится все более актуальной. Достижения технической кибернетики и электронной вычислительной техники позволили решить широкий круг задач, позволили приступить к разработке принципов создания машин для перевода с одного языка на другой, машин для управления автоматизированными системами на заводах, на транспорте, автоматов для продажи товаров и т. д. Но все эти автоматы и машины были слепы и глухи. Сложившиеся в вычислительной технике методы ввода информации с помощью перфокарт и перфолент требовали столько времени на набивку в них отверстий, соответствующих вводимой информации, что зачастую эта работа по времени значительно превышала машинное время решения задачи. Обработка на машине такой информации, как аэрофотоснимки, фотоснимки траекторий элементарных частиц в исследовательских камерах и т. п., вообще оказывалась невозможной. Таким образом, сложилось положение, при котором самые разные отрасли народного хозяйства, промышленности, транспорта, ряда наук все настоятельнее требовали решить проблему обнаружения и опознания широкого класса сложных сигналов различной физической природы. Это обещало повысить гибкость общения человека с различными машинами, которые смогут воспринимать команды управления непосредственно с голоса или считывать текст. В ряде случаев успешное решение задачи машинного опознания сигналов позволяло существенно повысить степень автоматизации. Машина могла взять на себя функции просмотра клинических анализов, снимков физических частиц, номеров железнодорожных вагонов, функции контрольного прослушивания музыкальных инструментов, прослушивания шумов механизмов и машин в контролируемых энергетических установках, прослушивания шумов сердца в норме и патологии с целью медицинской диагностики и т. д.

Проблема обнаружения и опознания сигналов различной формы стала привлекать все большее внимание. Попытки отвлечься от конкретной задачи опознания заданного набора сигналов и посмотреть на задачу опознания шире привели к формулировке ряда идей о наличии признаков опознаваемых сигналов, об инвариантности этих признаков в одних случаях и о значительных вариациях в других, о количественной оценке сходства сигналов. Терминологически за проблемой стало закрепляться название «опознание образов», чем подчеркивалась широта проблемы и значительное сходство опознающих систем с анализаторами, формирующими и анализирующими образы в ходе восприятия.

С возникновением бионики как нового научного направления получило всеобщее признание мнение о том, что проблема опознания образов является одной из центральных проблем бионики. Во-первых, такому признанию способствовала сложившаяся обстановка, в которой, как говорилось выше, запросы практики всемерно способствовали развитию методов опознания. Во-вторых, эта конкретная задача является действительно бионической по своему существу: ведь с самого начала и по сей день прообразом и эталоном почти любой опо-

знающей технической системы является соответствующий анализатор человека — зрительный, слуховой, тактильный.

На смену первым малоэффективным программам опознания пришли новые, построенные на основе более эффективных алгоритмов. За этапом расчета и моделирования на электронных вычислительных машинах наступил этап макетирования опознающих устройств. В некоторых удачных конструкциях настолько ярко проявилось сходство процессов «обучения» устройства и последующего опознания предъявляемых изображений с соответствующими процессами восприятия, что опознающие устройства стали называть перцептронами от слова «перцепция» (восприятие), а окончание «трон», как известно, является традиционным для электронных устройств (вспомним клистрон, магнетрон, синхрофазотрон и др.) .

Аналогии функций, выполняемых перцептроном и анализатором человека, позволяют проводить работу в области опознания в двух взаимно полезных направлениях. Первое из них мы подробно обсуждали выше. Назовем его условно техникой опознания, понимая под этим все технические аспекты построения и прикладного использования перцептронов. Второе направление можно назвать теорией и методологией опознания, понимая под этим как математическую сторону проблемы (поиски алгоритмов опознания, выбор принципов разбиения на классы, оценка сходства и др), так и биологическую ее сторону (анализ структуры и функций органов чувств, моделирование процессов восприятия и др.). Весь опыт работ в области опознания доказывает, что бионические принципы оказываются плодотворными для техники опознающих устройств, а действующие перцептроны часто являются хорошими моделями соответствующих органов чувств.

Не следует думать, что теория и техника обнаружения и опознания сигналов перестали быть проблемными направлениями и достигли высоких вершин, стали в ряд таких отраслей, как радиотехника, электронная вычислительная техника, радиотелеуправление. Положение дел таково: опубликованы тысячи работ по обнаружению и опознанию, намечаются контуры общей теории опознания, предложены десятки или сотни алгоритмов, промоделировано на универсальных электронных вычислительных машинах большое число процедур, связанных с опознанием, создано множество действующих моделей и серийно выпускается около десятка специализированных опознающих устройств. И все же можно утверждать, что опознание образов продолжает составлять проблему большой важности и огромной трудности, которая далека от окончательных решений.

В следующем разделе будет рассмотрено несколько типов перцептронов. Это далеко не полный обзор существующего множества опознающих устройств, но в какой-то степени они характеризуют и наиболее типичные разработки, и разнообразие подходов конструкторов к решению задачи, и разную степень приближения к биологическому прообразу в зависимости от целевого назначения опознающего устройства.

ПЕРЦЕПТРОНЫ

В результате разработки технических моделей биологических анализаторов было создано несколько экспериментальных образцов перцептронов, предназначенных для автоматического восприятия и опознания зрительных образов. В принципе возможно создание перцептронов, моделирующих органы слуха, обоняния, осязания и дру-

гих чувств. В частности, разработаны кибернетические автоматы, опознающие произносимые вслух названия цифр.

Практический интерес представляет собой разработка перцептронов, способных распознавать объекты, сигналы от которых недоступны непосредственному восприятию человека. К таким объектам можно отнести, например, источники инфракрасного излучения, источники радиочастотных или ультразвуковых колебаний и др.

Применение перцептронов может значительно упростить процесс ввода информации в машину, делая возможным автоматическое считывание машиной исходной информации и инструкций об ее обработке с печатного или рукописного текста или даже ввод в машину

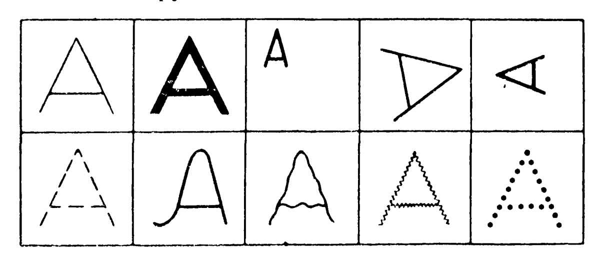


Рис 32 Примеры изоморфных преобразований изображения буквы.

устной информации и команд вместо предварительной заготовки перфокарт или перфолент

Кибернетические машины, снабженные заменителями анализаторов — перцептронами, будут представлять собой высший класс автоматов, которые могут в условиях автономного существования наиболее целесообразно взаимодействовать с внешней средой и другими кибернетическими автоматами.

Наконец, создание моделей анализаторов открывает в перспективе пути протезирования утраченных человеком органов чувств.

Остановимся несколько подробнее на наиболее разработанной задаче автоматического опознания визуальных образов, реализуемой при помощи так называемых квазизрительных перцептронов.

Опознание какого-либо объекта может быть определено как формирование некоторого сигнала или кода, однозначно соответствующего опознаваемому объекту, независимо от изоморфных преобразований этого объекта. Под изоморфными преобразованиями понимаются такие видоизменения объекта, которые не приводят к уничтожению его основной сути (с точки зрения опознающей системы). Иными словами, при изоморфных преобразованиях не должны быть уничтожены те основные признаки, по которым опознается объект.

Простейшие изоморфные преобразования заключаются в изменении масштаба изображения, его яркости, ориентации и местоположения относительно других объектов или рецептора. Подобные преобразования заглавной буквы «А» иллюстрируются верхним рядом на рис. 32. Более сложные преобразования того же изображения показаны в нижнем ряду на рис. 32. Здесь нарушения непрерывности линий буквы или некоторые искажения ее деталей могут сделать невозможным опознание ее автоматом, хотя человек по-прежнему воспринимает все эти начертания как букву «А». Таким образом, «с точки зрения» автомата некоторые из этих преобразований могут

оказаться не изоморфными, тогда как человек воспринимает их как изоморфные.

Автоматическое опознание зрительных образов (букв, цифр, силуэтов кораблей или летательных аппаратов и др.) может решаться двумя основными путями.

В одном случае образ, подлежащий опознанию, может быть точно описан аналитически, т. е. с ним могут быть сопоставлены некоторые определенные математические соотношения, тогда возможен детерминированный (строго определенный правилами, программой действий) процесс опознания. При этом для опознания используются предпрограммированные перцептроны, т. е. автоматы, состояния которых однозначно определяются программой, заложенной в них до начала процесса опознания.

Однако в ряде случаев достаточно точное логическое описание изображения представляет значительные трудности, а иногда оказывается и невозможным. В таких случаях для опознания могут быть использованы самоорганизующиеся перцептроны, которые как бы «обучаются», изменяя в процессе работы свою программу и устанавливая и запоминая при этом основные признаки объекта, по которым он может наиболее эффективно опознаваться.

Наиболее примитивное решение задачи опознания сводится к простому сравнению объекта, например опознаваемых печатных букв или цифр, с некоторым образцом (шаблоном, трафаретом).

Более совершенны и гибки методы считывания знаков с применением принципов развертки изображения, для которой могут быть применены как электромеханические (диски с прорезями), так и электронные (электроннолучевые трубки) устройства. При этом могут употребляться развертки по горизонтали, по вертикали, по спирали, по радиусу и др. В результате на выходе развертывающей части устройства получаются электрические сигналы, изменяющиеся во времени непрерывно или представляющие собой дискретные коды, соответствующие опознаваемым объектам.

Дальнейший процесс опознания заключается в сличении полученных от развертывающего устройства функций или кодов с соответствующими функциями или кодами, хранящимися в запоминающем устройстве предпрограммированного перцептрона, и установлении меры их взаимного соответствия. При этом в результате изоморфных преобразований опознаваемого изображения могут произойти такие изменения формы и структуры сигнала на выходе развертывающего устройства, которые сделают практически невозможным опознание объекта. Например, при строчной развертке при повороте на значительной угол опознаваемой буквы или цифры сигнал на выходе неузнаваемо изменяется. Резко изменяется также расстояние между импульсами, соответствующими тем или иным элементам опознаваемой буквы, при изменении масштаба этой буквы и т. п. Все это значительно увеличивает трудности машинного опознания, хотя не представляет почти никаких дополнительных трудностей при опознавании объекта человеком.

Следовательно, целесообразно попытаться разработать иные методы машинного опознавания, которые позволили бы автомату воспринимать основные характеристики начертания букв или цифр независимо от их размеров, ориентации и других изоморфных преобразований.

Один из таких методов, носящий название квазитопологического, может быть упрощенно описан следующим образом Представим себе

устройство, позволяющее совершать последовательный обход всех элементов буквы «А» и фиксировать на ней точки обрыва линии кодом 1 и точки, где сходятся три или более линий, — кодом 0.

Примем далее следующий метод обхода. Начав его, например, с нижней левой точки *а* (рис. 33), будем двигаться до точки разветвления (в данном случае до точки *б*), от которой нужно продолжать обход по ближайшему справа пути до точки *г* и далее до точки *д*. При попадании в точку, где линия обрывается (в данном

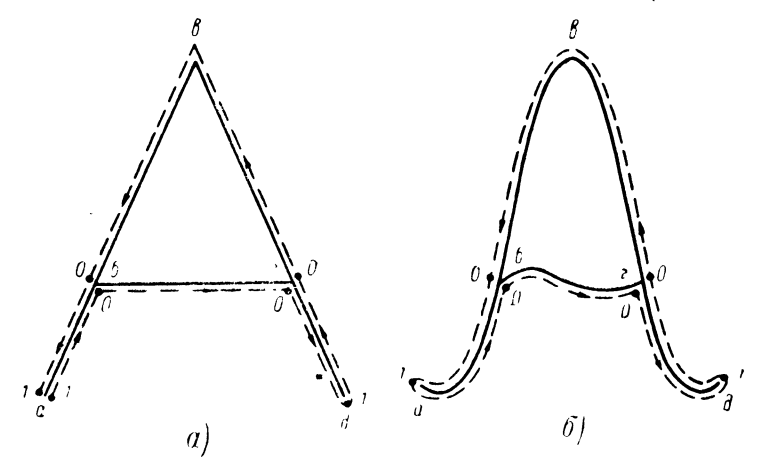


Рис. 33. Получение кода буквы «А» методом обхода ее изображения (квазитопологический метод).

случае точка *д*), нужно повернуть обратно и по тем же правилам продолжать движение до возвращения в исходную точку *а*.

Таким образом, при обходе буквы «А», изображенной на рис. 33, *а*, будут пройдены точки *а*, *б*, *г*, *д*, *г*, *в*, *б*, *а*. Это в соответствии с принятыми нами обозначениями характерных точек даст код: 1001001 (точка *в*, в которой нет ни обрыва, ни разветвлений линий, не рассматривается как характерная).

Тот же самый код будет получен и при ином начертании буквы «А», изображенном на рис. 33,*б*. Очевидно, что при поворотах или изменении масштаба изображения буквы описанный способ обхода будет давать один и тот же код, что значительно облегчает процесс опознавания. Тот же код может быть получен и при некоторых изменениях способа начертания буквы, как, например, закруглении острых углов, замене прямых линий кривыми и др.

Предложен также ряд других способов подготовки (препарирования) изображения и собственно процесса опознавания, описанных в специальной литературе по этому вопросу. Для опознавания более сложных изображений, характеризующихся не только контурами, но и их заполнением, яркостью, цветностью, объемностью и т. д., требуются значительно более сложные методы развертки или иного препарирования изображений. При этом процесс опознания настолько усложняется, что жесткое программирование его становится практически невозможным

Наиболее универсальный путь преодоления этих трудностей заключается, по-видимому, в способе, подсказываемом органической природой и заключающемся в создании самоорганизующихся опознающих систем.

Достаточно строго разработанной теории таких систем пока не существует, хотя к настоящему времени создано довольно много самоорганизующихся перцептронов. Некоторые из них уже упоминались в одном из первых разделов книги.

Наибольшее число публикаций (статей и книг) посвящено одной из первых самоорганизующихся опознающих систем — перцептрону «Марк-1» Ф. Розенблатта. Приведем некоторые сведения об этой модели.

Перцептрон «Марк-1» основан на теории статистического различения. Перцептрон способен после некоторого периода «обучения» воспринимать, классифицировать и символически отображать объекты окружающей среды без участия человека-оператора. Основная отличительная черта перцептрона состоит в том, что для его работы не требуется предварительное точное логико-математическое описание всех внутренних соединений и переключений.

Принцип действия перцептрона поясняется схемой, приведенной на рис. 34. На этой предельно упрощенной схеме показана модель перцептрона с тремя рецепторными, восемью ассоциирующими и одной эффекторной ячейками. Рецепторная ячейка включает в себя фотоэлемент и имеет два выхода. При освещении ячейки на одном из выходов появляется положительный, а на другом — отрицательный сигнал.

Соединения между рецепторными и ассоциирующими ячейками носят совершенно случайный, беспорядочный характер. Однако они фиксированы при изготовлении перцептрона и в процессе работы не меняются.

Если алгебраическая сумма сигналов, поступающих в какую-либо ассоциирующую ячейку от рецепторных ячеек, положительна и превышает некоторую пороговую величину (в данном простейшем случае — положительное напряжение, вырабатываемое одной рецепторной ячейкой), то соответствующая ассоциирующая ячейка выдает сигнал в эффекторную (реагирующую) ячейку. Суммарное значение сигналов, поступающих в эффекторную ячейку, сравнивается в ней с заранее установленным пороговым значением, в результате чего эффекторная ячейка срабатывает или не срабатывает.

При этом может произойти ложное срабатывание (а это, учитывая случайный характер монтажных соединений, вполне возможно), т. е. эффекторная ячейка может сработать, когда предъявленный перцептрону объект не должен опознаваться. Тогда оператор, занимающийся обучением перцептрона, изменяет параметры ассоциирующих ячеек, добиваясь от перцептрона правильной реакции. Таким же методом вырабатывается правильная реакция перцептрона и в противоположном случае, когда подлежащий опознанию предмет оказывается неопознанным. После некоторого периода обучения перцептрон в дальнейшем принимает правильные решения «самостоятельно».

Если теперь вспомнить те модельные представления, которые были введены в главе, посвященной нейронам, то нетрудно понять, что фактически структура перцептрона «Марк-1» является нейтронной сетью. Ассоциирующая ячейка есть не что иное, как пороговый нейрон, возбуждающийся в том и только в том случае, когда

алгебраическая сумма входных сигналов превысит некоторую пороговую величину. Эффекторная ячейка является моделью мотонейрона. Это не случайное сходство. Автор и создатель перцептрона «Марк-1». Ф. Розенблатт является специалистом по нейрофизиологии. В основу схемы перцептрона были положены нейрофизиологические представления о том, что связи между нейронами мозга

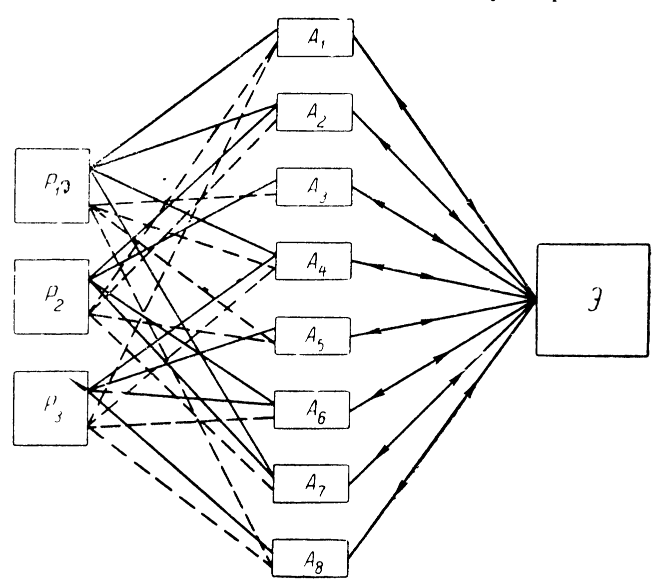


Рис. 34 Схема, поясняющая принцип действия перцептрона. *P* — рецепторные (чувствительные) ячейки; *A* — ассоциирующие ячейки, *Э* — эффекторная ячейка.

носят случайный характер. Из-за огромного числа нейронов в мозгу и еще большего числа соединений между ними (к отдельным нервным клеткам прилегает более 1 000 синапсов) невозможно передать полную схему мозга, его тонкую структуру с помощью наследственной информации. Кроме того, Ф. Розенблатт исходил из предположения, что память в нервной системе не локализована, а распределена по всему полю нейронов. Теорию перцептронов, развиваемую на основе этих представлений, Ф. Розенблатт называет теорией механизмов мозга.

Фактически в перцептроне «Марк-1» входное устройство представляет собой квадратную матрицу из 400 миниатюрных фотоэлементов. Общее количество ассоциирующих ячеек равно 512. Каждая такая ячейка содержит пороговый детектор, в котором производится оценка величины суммарного сигнала, поступающего от фоторецепторов. Если сигнал превышает пороговое значение, то ассоциирующая ячейка выдает сигнал той или иной величины и знака. Этот сигнал снимается с потенциометра, движок которого приводится в движение электродвигателем, управляемым оператором в процессе «обучения» перцептрона.

Эффекторные ячейки перцептрона представляют собой пороговые элементы триггерного действия. Таким образом, перцептрон, предназначенный для опознавания 32 букв алфавита, должен иметь пять эффекторных ячеек, что позволяет, применяя двоичный код, описать 32 объекта.

О сложности монтажной схемы устройства можно судить по следующим данным. От каждой из 400 рецепторных ячеек перцептрона «Марк-1» отходит 40 выходных проводников, подключаемых в случайном порядке к ассоциирующим ячейкам, каждая из которых имеет от 10 до 100 входов.

Для последующих реализаций схемы перцептрона были разработаны более компактные элементы центрального слоя. В одном из вариантов вместо потенциометра, управляемого электродвигателем, предлагается использовать магнитный интегратор, выполненный на основе ферритового сердечника сложной конфигурации, так называемый «минд», что расшифровывается как «магнитный интегратор, подобный нейрону» (в английской транскрипции).

Для перцептрона характерен длительный и сложный процесс «обучения». Существуют различные режимы обучения «с поощрением», «без поощрения», «с наказанием» и др. Из-за случайного характера связей длительность процесса обучения и его эффективность («сходимость процесса») могут значительно различаться для разных перцептронов одного и того же класса. Каждый отдельный перцептрон при обучении как бы проявляет свою «индивидуальность». Это хорошо соответствует психологическим представлениям об обучении разных индивидуумов. По окончании «обучения», когда потенциометры (или интеграторы) приведены в определенные состояния и доучивание перцептрона не осуществляется, можно определить эти состояния и построить новую схему, в которой вместо переменных пороговых величин используются постоянные, соответствующие «обученным» состояниям. Так, вместо потенциометров могут быть впаяны постоянные сопротивления, номиналы которых соответствуют окончательным положениям движка потенциометра. Это позволяет после окончания процедуры обучения создать много относительно простых устройств, абсолютно подобных по эффективности опознания сложной опознающей перцептронной системе, которую они копируют. По такому принципу было создано несколько компактных, «непереучиваемых» перцептронов, предназначенных для опознания тех и только тех объектов, на которые был «обучен» перцептрон-прообраз.

Большая избыточность случайных связей и распределенная память способствуют высокой надежности перцептронных схем. Для проверки надежности проводились такого рода эксперименты. Обученный на опознание ряда изображений перцептрон подвергался операции уничтожения отдельных элементов. Ясно, что для этого совсем не обязательно физически уничтожать нейроноподобные ячейки. Их просто электрически полностью выключали из схемы. В зависимости от того, насколько удачны были попадания экспериментатора в наиболее чувствительные точки системы, с уничтожением нейронов перцептрон в большей или меньшей степени ухудшал надежность правильного опознания изображений. Но было установлено, что даже после того, как $^7/_8$ от общего числа нейронов было полностью выведено из системы, вероятность правильного опознания была не ниже, чем 60—70%. Если вспомнить обычную электронную схему, например, радиоприемника, которая полностью перестает

выполнять свои функции, если только выйдет из строя хотя бы один элемент, то станет ясным, что несмотря на в сущности примитивную схему перцептрона «Марк-1», она обладает необычайными способностями функциональной живучести.

В перцептроне «Марк-1» можно насчитать три слова: рецепторный, ассоциирующий, эффекторный. В последующих разработках устройств типа перцептрона «Марк-1» были использованы многослойные структуры — четырехслойная и более. По данным теории

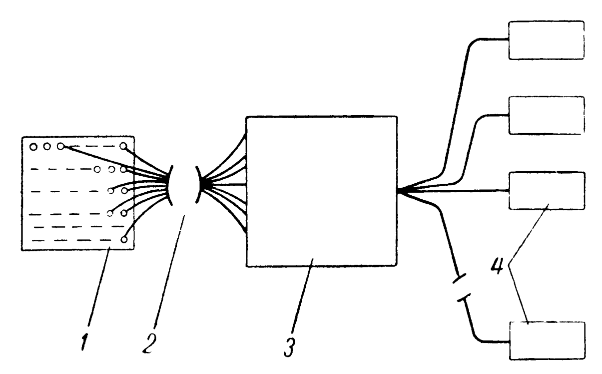


Рис. 35. Блок-схема перцептрона.
1 — поле рецепторов; *2* — случайные соединения; *3* — блок ассоциирующих ячеек; *4* — эффекторные ячейки.

это должно повышать эффективность перцептрона. Экспериментальные проверки подтвердили это теоретическое предположение.

Блок-схема перцептрона в целом приведена на рис. 35.

В одном из первых разделов в связи с обсуждением работы отборочного фильтра в зрительном анализаторе упоминалась модель глаза лягушки. Рассмотрим подробнее схему моделирования зрительных процессов, происходящих в глазу лягушки, на примере устройства, сконструированного и построенного инженерами фирмы RCA. Эта модель демонстрировалась на одном из симпозиумов по бионике в США.

На рис. 36 дано схематическое изображение зрительного анализатора лягушки. В верхней левой окружности показаны силуэты предметов, отображаемых на сетчатку в ходе моделирования процессов в отборочном фильтре глаза. На выходе периферийной части глаза показаны ответвления и четыре круга, в каждом из которых представлены те элементы изображения, на которые отборочный фильтр лягушки разлагает все объекты, появляющиеся в поле зрения. Эти элементы условно называют следующим образом: I — края темного изображения на светлом фоне; II — выпуклости определенной кривизны; III—линии контраста; IV — потускнения (последнее следует понимать как своего рода угасающее послесвечение, наблюдать которое можно на экране электроннолучевой трубки).

Модель глаза лягушки представляет собой оптико-электронное устройство параллельного действия. Входные сигналы, несущие информацию о наблюдаемом предмете, отображаются на поле фотоэлементов (фоторецепторов), которые вместе с полем нейроноподоб-

ных логических элементов образуют первый слой «глаза» лягушки. Выходные сигналы первого слоя, как и трех последующих слоев, можно наблюдать по загоранию неоновых лампочек, число которых соответствует числу элементов (для первого слоя — числу фоторецепторов, для второго и третьего — числу нейронов). Таким образом, имеется четыре слоя модели — по числу операций выделения элементов изображения, между которыми осуществляется оптическая связь (световое соединение) с помощью пар «неоновая лампа — фотосопротивление». Всего в модели более 2 000 таких пар соединений. Входное поле второго и последующих слоев представляет собой как бы внутреннее рецептивное поле с оптическим входом и оптическим же выходом. Если пренебречь инерционностью фотосопротивлений и временем срабатывания нейроноподобных пороговых элементов, то можно считать, что практически мгновенно все четыре поля выдают информацию о предмете, попавшем в поле зрения. В высшие отделы анализатора лягушки (в рассматриваемой модели — на выходные индикаторы) поступает не изображение предмета, а совокупность сигналов о фиксированных признаках: контур, характерные выпуклости, линии контраста, степень подвижности предмета. Мозг лягушки принимает решение о том, насколько наблюдаемый предмет похож (по данной совокупности признаков) на добычу — мушку, комара и др. Специалисты фирмы RCA надеются, что подобного рода моделирование зрительного анализатора лягушки позволит им создать опознающие устройства для разведывательных систем, способных мгновенно распознавать летящие ракеты, в то время как существующие электронно-вычислительные устройства, несмотря на огромное быстродействие, затрачивают слишком много времени на баллистический расчет, по результатам которого также возможно опознание ракеты.

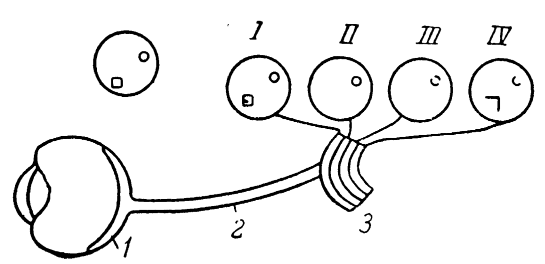


Рис. 36. Схематическое изображение зрительного анализатора лягушки.
1 — сетчатка; 2 — зрительный нерв; 3 — мозг.

Другая американская фирма (Дуглас Айеркрафт) создала действующую модель глаза голубя. Специалистам известно, что голубь очень хорошо воспринимает изображения. В зрительном анализаторе птицы, так же как и в глазу лягушки, происходит многоступенчатая предварительная обработка информации. Особый интерес представила способность глаза голубя мгновенно отбирать объекты, движущиеся в определенном направлении. Это свойство было названо «обнаружением направленного движения». Прикладное значение детектора направленного движения заключается в том, что обзорная радиолокационная станция, обладающая таким устройством, может

обнаружить самолеты, летящие в заданном направлении, например в сторону авиабазы, и осуществлять слежение за этими самолетами, не реагируя на другие подвижные объекты, летящие в других направлениях.

Схематическое изображение зрительного анализатора голубя практически совпадает с той схемой, которая была приведена на рис. 31. Рассматриваемая модель глаза голубя основана на следующих представлениях. Принято, что сетчатка глаза птицы пред-

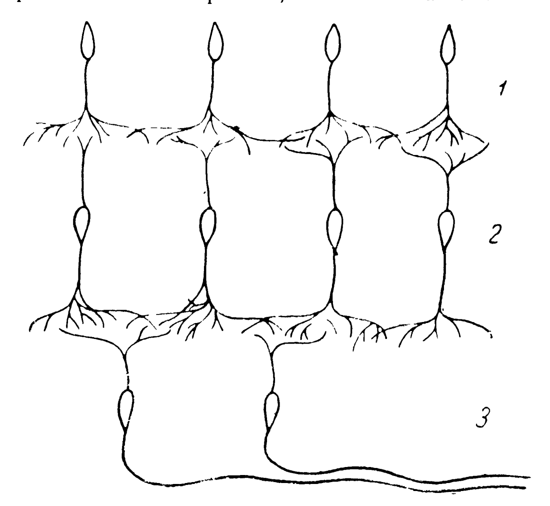


Рис. 37. Трехслойная структура глаза голубя.

ставляет собой трехслойное устройство, показанное на рис. 37. Внешний слой фоторецепторов, воспринимающих информацию об объектах, находящихся в поле зрения модели глаза, состоит из колбочек *1*. Воспринимаемые глазом сигналы световой природы преобразуются в колбочках в нейродинамические импульсы, поступающие на промежуточный слой нейронов *2*. Это так называемые биполярные клетки, или просто биполяры. Последний слой нейронов сетчатки образован ганглиозными клетками *3*, выходы которых собраны в плотный жгут нервных волокон, идущих в мозг голубя. Конечно, это далеко не полная картина структуры глаза голубя. Здесь опущены из рассмотрения такие элементы, как горизонтальные нервные клетки, участвующие в передаче сигналов от колбочек к биполярам, амокринные клетки, клетки механизмов обратной связи от мозга к сетчатке и ряд других.

В соответствии с этими упрощенными представлениями модель глаза голубя имеет функциональную схему, показанную на рис. 38. Рецепторное поле (сетчатка, ретина) *1* выполнено в виде набора фотодиодов, после каждого из которых стоит эмиттерный повторитель. Каждый из эмиттерных повторителей панели *2* имеет несколько связей, ведущих к моделям биполяров *3*. Разветвляющиеся случайные соединения между выходами фоторецепторов (пара «фотодиод-эмиттерный повторитель»), моделями биполяров и ганглиозных клеток *4* выполнены с помощью специальных коммутационных пане-

лей (в связи с этим можно вспомнить принцип случайных соединений, использованный в перцептроне «Марк-1»). Наконец, выход всего устройства выполнен в виде панели индикаторов 5.

Схема модели глаза голубя имеет много отличий от схемы глаза лягушки. Если иметь в виду не столько техническую, сколько бионическую сторону, то следует указать на такие отличия. Помимо очевидного различия в общей структуре моделируемой части анализаторов, существенно различны модели нейронов, используемые в рассмотренных двух схемах. В модели глаза лягушки были использованы нейроны, осуществляющие пространственное суммирование и сравнение полученной суммы с порогом. В рассматриваемой сейчас модели применены нейроны, значительно более близкие к биологическому прообразу. В них осуществлены механизмы рефрактерности. Отклик нейрона представляет собой не одиночный двоичный сигнал, как это имеет место в формальных нейронах, а дискретную последовательность, промодулированную по закону кодово-импульсной модуляции, что соответствует характеру импульсации, возбуждаемой в живой нервной клетке. Наконец, в нейронах модели глаза голубя реализована способность запоминать предысторию активности. Таким образом, не только нейронная сеть моделируемого анализатора имеет структуру, близкую к структуре прообраза, но и отдельные функциональные элементы существенно близки к соответствующим элементам глаза голубя.

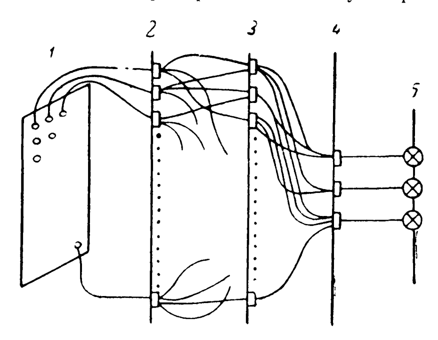


Рис. 38. Функциональная схема модели глаза голубя.

Каждый нейрон модели выполнен в виде отдельной платы, набор которых размещается на специальных панелях стандартной стойки. Для моделирования использовались схемы с частотой переключения несколько килогерц, что соответствует быстродействию биологического нейрона. Но так как целевым назначением модели является ее использование в радиолокационных станциях обнаружения и слежения, предусмотрена возможность создания аналогичной схемы на элементах с частотами переключения несколько мегагерц.

В первой модели глаза голубя используется 110 фотодиодов рецепторного поля, 80 моделей биполярных нейронов и 6 элементов, подобных ганглиозным клеткам. С помощью этой модели удалось продемонстрировать способность обнаруживать некоторые предметы, движущиеся в определенном направлении. На неподвижные предметы и предметы, движущиеся в неконтролируемом направлении, модель «не обращает внимания». В ходе экспериментов в широких пределах менялся характер соединений между отдельными слоями нейронов. Для этой цели были выполнены специальные коммутационные панели.

Исследователи предполагают значительно расширить возможности модели за счет увеличения числа элементов (фоторецепторов — до 200, биполяров — до 150, ганглиозных клеток — до 25).

Вопросам автоматического опознавания визуальных акустических и радиолокационных объектов в настоящее время посвящается все большее количество теоретических и экспериментальных разработок. Это дает основание надеяться, что уже в ближайшее время перцептроны смогут найти достаточно широкое применение.

Специалистами фирмы Сперри создано оргигинальное опознающее устройство, получившее название «септрон». Устройство используется для опознания звуковых сигналов и представляет собой систе-

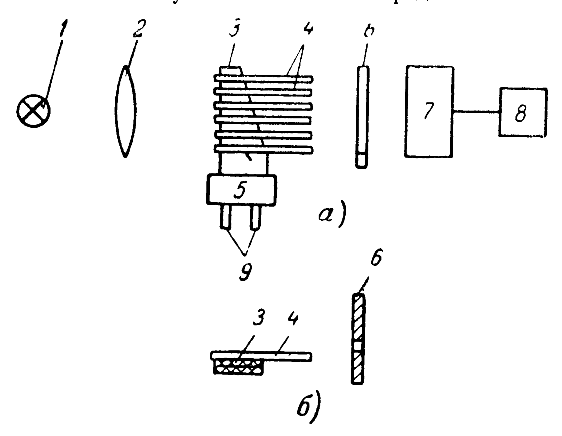


Рис. 39 Блок-схема оптико-волоконного устройства типа «септрон».

1 — источник света; 2 — оптический конденсор; 3 — акустический преобразователь; 4 — световоды; 5 — обойма; 6 — транспарант (фотомаска), 7 — фотоэлемент; 8 — пороговый элемент (или индикаторное устройство); 9 — выводы акустического преобразователя.

му, в которой комплексно совмещаются принципы электроники, оптики и акустики. Основными элементами устройства являются тончайшие стеклянные нити — оптические волокна. Выполненные из кварца или оптического стекла, эти нити обладают способностью проводить свет с очень малым затуханием. Световод длиной 3 *м* обеспечивает на выходе более 40% входного светового сигнала, но так как в рассматриваемом устройстве используются очень короткие волокна (менее 30 *мм*), то практически потери света в стеклянной нити незначительны.

Рассмотрим принцип действия септрона.

На рис. 39,*а* приведена упрощенная блок-схема устройства. Входной (опознаваемый) звуковой сигнал в виде напряжения, развиваемого микрофоном или другим входным устройством, поступает на выводы *9* преобразователя *3*, в качестве которого может быть использован пьезокерамический элемент, электродинамический преобразователь типа «искусственное горло» и т. п. На преобразователе *3*, размещенном в обойме *5*, закреплены световоды *4*, торцевые части которых подсвечиваются от осветителя *1* через конденсорную линзу *2*, формирующую световой поток из параллельных лучей. Правая часть световодов *4* представляет собой свободно закреп-

ленные стержни различной длины. Из рисунка ясно, что свободная длина каждого из стержней определяется косым срезом пьезоплатформы *3*.

Световой поток, проходящий через световоды, попадает на транспарант *6*. В септроне роль транспаранта выполняет система фотомасок. С целью упрощения на рис. 39 транспарант показан в виде щелевой диафрагмы. Щель устанавливается таким образом, чтобы свет попадал на фотоэлемент *7* в том и только в том случае, если отклонение световода от нулевого положения в результате колебаний превысит некоторый порог, величина которого определяется уровнями помехи, величиной входного сигнала и другими факторами.

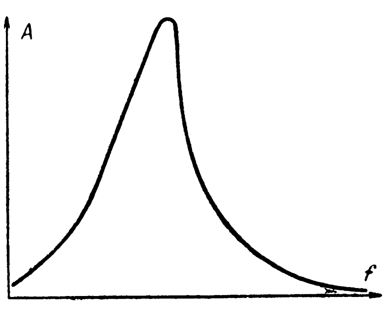


Рис. 40. Резонансная характеристика колебаний одиночного световода.

В том случае, когда во входном сигнале содержатся составляющие, совпадающие с резонансными частотами свободно закрепленных световодов (с точностью до ширины полосы резонатора-световода), свободный конец стеклянной нити начинает колебаться с собственной частотой и амплитудой, определяемой мощностью данной составляющей. Типичная характеристика колебаний одиночного световода показана на рис. 40.

На рис. 39,*б* дана вторая проекция устройства, для того чтобы проиллюстрировать механизм работы щелевой диафрагмы, экранирующей световой поток, который проходит через неподвижные световоды.

На блок-схеме довольно трудно показать общий экран, но должно быть ясно, что работа септрона предусматривает такую экранировку осветителя *1*, при которой световой поток от источника света к фотоэлементу может пройти только через световоды *4*, а никак не минуя их.

Дадим краткую характеристику основных элементов септрона в связи с тем, что они не являются традиционными для радиоэлектроники и может сложиться впечатление о сложности изготовления таких устройств.

В качестве источника света может использоваться обычная лампа накаливания небольших размеров. При более строгом подходе выбирают такие лампы, которые достаточно близки к точечному источнику света. Практически обычная лампа типа СП-61 (напряжением 6 *в*, мощностью 20 *вт* со световым потоком 250 *лм*) имеет настолько малый диаметр спирали (0,7 *мм*), что вполне может служить точечным источником света.

Лампа помещается в фокальной плоскости конденсатора, с помощью которого блок волоконной оптики освещается со стороны входных торцов параллельным пучком лучей.

Оптический конденсор должен иметь короткое фокусное расстояние и может состоять из нескольких линз, расположенных в одной плоскости так, чтобы образовался световой поток в виде нескольких параллельных лучей. Можно применить и одну линзу

с углом охвата порядка 40°, хотя это приведет к некоторой неравномерности освещения световодов.

Узел волоконной оптики является центральной частью устройства. Ассортимент волоконной оптики в настоящее время чрезвычайно разнообразен. При изготовлении волокон применяются разные составы стекла, кварца, прозрачных пластмасс. Волокна могут иметь различный профиль сечения; размеры сечения лежат в широком диапазоне. Минимальный диаметр круглого волокна составляет 5—10 *мк*, так как при дальнейшем уменьшении диаметра в силу соизмеримости длины волны света и диаметра световода возникают отрицательные эффекты, как в волноводах при передаче радиосигналов: усиливается просачивание света из одного световода в другой, увеличиваются потери световой энергии из-за нестабильности размеров световодов и немонохроматичности источника света. Ограничений по максимуму диаметра световодов практически не существует.

Современная технология позволяет изготавливать световоды большой длины — более 1 000 *м*. В септронах и им подобных устройствах используются отрезки световодов длиной в несколько десятков миллиметров, что существенно упрощает проблему калибровки и отбраковки стеклянных нитей (в силу множества неконтролируемых причин до сих пор не удается вытягивать длинные световоды строго заданного диаметра).

Полоса пропускания одиночного световода составляет около 2% по уровню 0,7, что соответствует добротности около 50. Существуют различные приемы значительного увеличения добротности (на два порядка), а также некоторого расширения полосы пропускания одиночного световода.

В качестве расчетной формулы для определения собственной частоты колебаний f_c отдельного световода может служить выражение:

$$f_c = \frac{1,875^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\mu}},$$

где l — длина световода;
E — модуль Юнга;
J — момент инерции сечения световода;
μ — масса единицы длины световода.

Для раскачки пучка световодов могут использоваться различные преобразователи: электродинамические, пьезокерамические и др. Общие характеристики здесь давать затруднительно, потому что они зависят от условий решаемой задачи. Практически волоконная оптика может непосредственно работать в звуковом диапазоне частот — от десятков герц до десятков килогерц. Следовательно одной из характеристик преобразователя является полоса частот. Другими характеристиками служат: равномерность частотной характеристики, положение резонанса, амплитуда колебаний и т. д. В зависимости от выбора преобразователя значительно варьируются и конструкции узла волоконной оптики, закрепляемой на преобразователе: непосредственное крепление, передача через систему рычагов и т. д.

Транспаранты септрона, как правило, выполняются на фотопластинах. Различают три основных вида транспарантов: 1) маска статических положений световодов, блокирующая световой поток из неподвижных торцов; 2) исключающая маска, выполненная в виде негативного изображения светового узора определенным образом

раскачивающихся нитей; 3) пропускающая маска, выполненная в виде позитивного изображения светового узора, который должен преодолеть транспарант. Естественными требованиями к фотопластинам являются: повышенная плотность, исключающая прохождение светового потока через экспонированный участок транспаранта, и разрешающая способность, обеспечивающая достаточную четкость экспонированного светового узора.

За системой транспарантов стоит фотоэлемент, который регистрирует проходящий световой поток. Если необходимо сохранить тонкую структуру выходного сигнала, то в качестве фотоэлемента

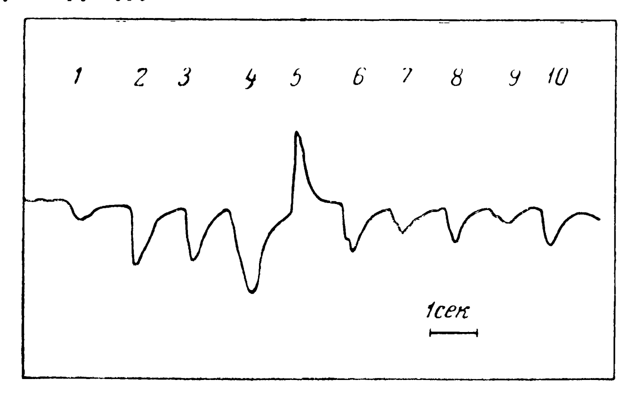


Рис. 41. Отклик септрона, обученного на звуковой образ слова «five» (пять), на последовательность слов от «one» до «ten» (от одного до десяти).

используются безынерционные приборы типа фототранзисторов, фотоэлектронных умножителей и др. В других случаях используются интегрирующие фотоэлементы: фотосопротивления, фотодиоды и др.

Таким образом, характеризуя работу устройства в целом, следует отметить, что в нем осуществляется сложное преобразование входного сигнала по следующей схеме входной звуковой сигнал — электрический сигнал — механические колебания преобразователя — резонансные механические колебания световодов — световое динамическое изображение. Динамику изменения светового узора на выходе световодов можно наблюдать визуально (при отсутствии транспарантов). Фактически в септроне устанавливается всегда система масок, на которых экспонирован узор, характеризующий заданный класс сигналов. Экспонирование фотомасок осуществляется при подаче на вход типовых последовательностей опознаваемых сигналов. Это соответствует «обучению» септрона. Обученный септрон может опознавать сигнал только своего класса. На рис. 41 показан отклик септрона на «свой» сигнал — произносимое вслух слово «five» (пять) в виде максимального по амплитуде выброса. Все остальные слова от «one» до «ten» (от одного до десяти) дали значительно меньшие по величине выбросы, которые не приводят к срабатыванию порогового элемента септрона, обученного на сигнал «five».

Судя по многочисленным журнальным публикациям, сотрудники фирмы, разработавшей септрон, проводят работы по записи и расшифровке звуковых сигналов, издаваемых дельфинами. Достаточно

очевидны и другие прикладные использования септронов: в медицинской и технической диагностике, в спектральном анализе, в многоканальных системах параллельного действия и др.

Основными достоинствами септронов являются следующие. Во-первых, это первая техническая система аналогового принципа действия, в которой производится параллельный (одновременный) спектральный анализ по чрезвычайно большому числу каналов (свыше 1 000), что приближает структуру этой опознающей системы к периферийной части слухового анализатора высших животных и человека. Во-вторых, выход септрона позволяет легко осуществлять согласование с цифровыми схемами дальнейшей обработки сигналов. В-третьих, одиночный септрон имеет чрезвычайно простую конструкцию, малый вес и габариты, не включает в себя дорогостоящих и дефицитных элементов. Таким образом, хотя возможности одного септрона ограничены и целиком определяются той предварительной информацией, которая записана на транспаранте, легко осуществить систему из большого числа септронов, которая сможет выполнять широкий круг функций, связанных со сложными процедурами обработки информации: обнаружение, опознание и ряд других.

В заключение следует отметить следующее. Выше были рассмотрены некоторые из большого числа разработанных опознающих устройств. Вопросам автоматического опознавания визуальных, акустических, радиолокационных, гидроакустических и других сигналов в настоящее время посвящается все большее количество теоретических и экспериментальных работ. Не следует переоценивать сегодняшние возможности опознающих систем. Но вместе с тем есть все основания считать, что уже в ближайшее время перцептроны смогут найти достаточно широкое практическое использование.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

НЕКИБЕРНЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

БИОНИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

Многие фабрики и заводы имеют высокие дымоходы — так называемые заводские трубы. Их конструкция определилась не сразу. Потребовались многие годы поисков и ошибок, пока строители научились создавать такие сооружения, которые наилучшим образом противостоят порывам ветра, обеспечивают максимальную прочность при минимальном расходе металла. И только в последние годы ученые обратили внимание на то, что в конечном итоге люди при сооружении заводских труб пришли к тем решениям, которые давно известны в растительном мире планеты. Сейчас нас поражает сходство распределения сечений и материала в заводской трубе и некоторых видах тростника, сходство в принципах армирования стенок трубы и стебля. Одна из целей бионики и состоит в том, чтобы ускорить процесс поиска оптимальных конструкций, обратив внимание конструкторов в самом начале проектирования на некоторые аналоги, наблюдаемые в живой природе.

Сейчас известно много запоздалых бионических открытий. Обнаружено, что знаменитая Эйфелева башня в Париже имеет конструкцию, подобную берцовой кости человека. Распределение материалов в берцовой кости обеспечивает высокую прочность несущей части тела при довольно экономичном расходе материала. К этому же довольно часто стремятся при сооружении мачт, высоких опор, труб

и др. Возможно, что очень часто люди, сталкиваясь с новой для них задачей, находили решение, не отдавая себе отчета в том, что оно подсказано живой природой. В других случаях это проступало в явном виде, но никого не интересовали «бионические» принципы конструкции, и это никак не обсуждалось. В наши дни, когда бионика становится общепризнанным подходом к решению задач, бионические принципы конструирования не только привлекли внимание конструкторов, но благодаря определенным успехам уже получили некоторое признание. Приведем несколько примеров.

Существующие транспортные средства предполагают наличие дороги — грунтовой, шоссейной, рельсовой — и полное отсутствие даже незначительных преград. Человек же, как и многие животные, прекрасно обходится без специальных покрытий грунта и легко перешагивает через рытвины, камни и т. п. В этом смысле ноги являются идеальным конструктивным решением механизма перемещения по пересеченной местности. Надо сказать, что первые попытки создания шагающих конструкций относятся еще к прошлым столетиям, хотя в те годы существенных успехов достигнуто не было. Сейчас этот вопрос волнует зарубежных конструкторов машин в связи с перспективой освоения других планет и поверхности Луны, где первые экспедиции должны будут решать практически задачу транспортировки грузов, а до строительства дорог дело дойдет не скоро. Использование же летательных аппаратов затруднено отсутствием атмосферы (на Луне) или высокой плотностью воздуха (на Венере и некоторых других планетах). В связи с этим многими зарубежными фирмами ведутся работы по созданию шагающих конструкций. В программах этих работ большое внимание уделяется изучению структурных и функциональных особенностей ног человека и животных.

С проблемой перемещения по рыхлому снегу люди столкнулись в таких районах нашей планеты, как Крайний Север и Антарктида. Наблюдая за коренными обитателями Антарктиды — пингвинами, инженеры пришли к принципиально новому для техники решению. Конструктор А. Ф. Николаев заметил, что эти птицы, утратившие способность летать, приспособились к быстрому перемещению по поверхности рыхлого снега следующим образом: лежа на брюхе, пингвины отталкиваются короткими и сильными крыльями — ластами от снега, как лыжники отталкиваются палками. Это позволяет им развить скорость до 25 *км/ч*. По такому принципу и были созданы снегоходные машины типа «Пингвин». Машина имеет широкое днище, а поступательное движение вперед обеспечивается за счет отталкивания боковыми плицами от снега. Заимствование принципа, как почти всегда в бионике, не является абсолютно точным. И габариты машины много больше, чем у ее биологического прообраза, и мощность, и конструкция толкающей части несколько иные. Таким образом, конструкторы пошли дальше, обеспечив своему «Пингвину» скорость перемещения до 50 *км/ч* и некоторые другие возможности, диктуемые поставленными требованиями. Но факт бионического заимствования основного принципа конструктивного решения сам по себе интересен.

Великолепное создание природы — человеческая рука — тоже давно привлекла внимание конструкторов. Создано большое число манипуляторов, в которых в той или иной степени повторяются отдельные элементы конструкции руки. Наибольшая степень сходства достигнута в активных протезах человеческой руки. Большой изве-

стностью пользуются у нас в стране и за рубежом работы группы ученых и инженеров во главе с А. Е. Кобринским. Они создали протез, который управляется с помощью биопотенциалов, возникающих в мышце предплечья. Человек, к предплечью которого приложены электроды, мысленно сгибает руку или пальцы рук. Сигналы управления, посылаемые мозгом, развивают в мышцах предплечья биотоки, которые наводят э. д. с. в приложенных к коже электродах. После фильтрации и усиления снятые сигналы посылаются в исполнительные элементы протеза, который приходит в движение, осуществляя замысел человека. Гуманистическая направленность этих работ достаточно очевидна. Уже многие люди, лишившиеся кистей рук, вновь получили возможность с помощью биопротезов вернуться к трудовой деятельности, получили возможность вновь обслуживать себя за столом, брать с помощью чудесных протезов довольно хрупкие вещи.

Эти же принципы могут быть заложены в конструкции манипуляторов, управляемых человеком на большом расстоянии. Так, оператор может выполнять различные процедуры внутри помещений, куда нельзя входить из-за высокого уровня радиоактивности, на больших глубинах, куда трудно или невозможно спуститься водолазу, в космосе и т. д.

Принцип усиления сигналов управления позволяет развить идею манипуляторов, управляемых оператором, в таком направлении. Пусть сигналы, управляющие исполнительными двигателями захвата и перемещения конечности манипулятора, усиливаются до мощности, намного превосходящей мощность руки человека. Разумеется, мощность исполнительных двигателей также должна быть много более той, что используется в протезах руки. Тогда сила захвата и перемещения позволит биоуправляемому манипулятору выполнять такую работу, которая не под силу человеку, не вооруженному такой системой. Такого рода конструкции манипуляторов пока еще недостаточно гибки. Они практически используются для выполнения относительно простых работ, не только удлиняя человеческие руки, но и усиливая их в сотни и тысячи раз. Важно, что продолжают вестись интенсивные работы по усовершенствованию таких манипуляторов, и в качестве прообраза служит человеческая рука — образец гибкости и универсальности. Для этого ведутся специальные бионические исследования руки, которые подсказали ученым немало полезного не только о конструкциях, но и о механизмах управления. Не будем здесь останавливаться на вопросах управления, хотя они достаточно интересны и имеют принципиальное значение. Достаточно сказать, что введение в манипуляторы датчиков давления (по принципу осязательного восприятия давления на поверхность кожи руки) позволило создать обратные связи манипулятора (или протеза руки) к человеку, который благодаря этому стал «чувствовать», с какой силой сжимают пальцы манипулятора захватываемый предмет. Протез руки, о котором шла речь выше, снабженный такими датчиками, позволяет теперь брать в искусственные руки такие хрупкие предметы, как куриное яйцо, бокал и др. В манипуляторах, предназначенных для захвата и перемещения тяжелых предметов, нужны датчики меньшей чувствительности, но они нужны, они крайне полезны, так как существенно повышают эффективность использования манипуляторов.

Дальнейшим развитием идеи многократного усиления руки можно считать конструкцию, предложенную инженерами компании Дже-

нерал Электрик. В конструкции, названной «Хардимен» (силач), имеются манипуляторы, повторяющие все четыре конечности человека — две руки и две ноги. Основой конструкции является прочная шарнирная рама, выполняющая функции своего рода «внешнего скелета» человека. Помещенный внутри этой конструкции человек может с помощью биопотенциалов, снимаемых с мышц рук и ног, управлять механическими «руками» и «ногами». Сигналы управления многократно усиливаются за счет аккумуляторного источника питания, прикрепленного к шарнирной раме, и исполнительных двигателей, встроенных в искусственные «конечности». Благодаря этому человек может свободно поднимать и переносить грузы в сотни килограммов.

А теперь вспомним, что бионика не препятствует значительному отклонению от оригинала и что сигналы управления могут одновременно посылаться из одного управляющего центра сразу к нескольким управляемым, исполнительным органам. Значит, ничто не мешает в такой конструкции иметь не две ноги, а хоть все сорок. Пока конструкторы этого класса бионических систем ограничились четырьмя шагающими конечностями, которые перемещают кабину. Внутри кабины мысленно шагает человек, осуществляющий биоуправление механическими ногами. Так, американскими инженерами была сконструирована бионическая система на четырех ногах, длиной около 2 *м* каждая. Это паукообразная конструкция имеет те преимущества перед двуногой системой, что в условиях бездорожья и неровной местности человеку, находящемуся внутри кабины, легче сохранять устойчивое положение кабины на «ногах». Сообщается, что в условиях бездорожья такая машина перемещается со скоростью около 8 *км* в час. Высокие ноги машины позволяют легко преодолевать канавы и другие неровности почвы. Но так как высота кабины препятствует входу и выходу человека, предусмотрен опять-таки «бионический» механизм машина может становиться «на колени», как, например, верблюд.

Наряду с шагающими механизмами в бионике широко исследуются способы полета, найденные живой природой. Общеизвестны успехи современной авиации, но в силу ряда причин конструкторы не оставляют без внимания и механизм машущего крыла. Надо сказать, что современная аэродинамика настолько жестко привязана к сложившейся конструкции фюзеляжа и несущих плоскостей, что принципиально не позволяет проводить точный анализ механизмов типа «машущее крыло» так эффективно, как это осуществляется для общепринятых жестких конструкций. Это дало повод для шутливой надписи, висящей в помещении одного из конструкторских бюро: «Конструктор, помни, что по законам аэродинамики жук не должен уметь летать!». Но если говорить серьезно, то уместней вспомнить рассуждения по аналогичному поводу такого гениального ученого, как Леонардо да Винчи: «Птица — это аппарат, действующий согласно математическим законам. И воспроизвести этот аппарат со всеми его движениями — в пределах возможностей человека».

Пусть нереально получить в ближайшее время возможность создания летательных аппаратов, которые так же легко садились бы на маленькую площадку, как птица садится на ветку. Пусть первые конструкции аппаратов с машущим крылом уступают в скорости и грузоподъемности самолетам. Это не смущает энтузиастов проблемы «машущего крыла», и они предлагают все новые и новые конструкции, заимствуя опыт птиц и насекомых. Возможно, что летательный аппарат, построенный по чертежам Леонардо да Винчи, не смог бы

летать. Но в наши дни почти ежегодно проходят большие соревнования, на которых конструкторы машин «машущее крыло» демонстрируют все большие и большие успехи. Не исключено, что очень скоро человек сможет подняться в воздух с помощью портативного аппарата, принцип действия которого заимствован у летающих живых существ: ведь на смену любительским конструкциям приходят профессиональные разработки, которым предшествовали тщательные бионические исследования по аэродинамике машущего крыла, изучение особенностей строения крыла, особенностей движения воздуха в непосредственной близости от крыла, особенностей системы управления и многое другое.

Крыло стрекозы подсказало в свое время авиаконструкторам способ устранения флаттера — страшного явления, возникающего на определенной скорости полета, когда внезапно и бурно возникающие вибрации в кратчайшее время разрушают летательный аппарат. Однако даже такой наблюдательный и талантливый ученый, как Н. Е. Жуковский, проводивший много наблюдений за полетами насекомых и птиц, не смог своевременно оценить этот «патент» живой природы. Признание и развитие идей бионики применительно к задачам воздухоплавания позволит выявить, своевременно и плодотворно использовать другие секреты живой природы. Быть может, бесшумный полет совы подскажет авиаконструкторам эффективные способы снижения лобового сопротивления, а изящные зависания колибри в воздухе над цветком — новые, отличные от вертолетных, способы вертикального взлета и посадки.

В рамках одного из ответвлений бионики, которое принято называть гидробионикой, широко исследуются конструктивные решения водных обитателей, позволяющие им при относительно малых затратах энергии быстро перемещаться в такой плотной среде, как вода. Многообразны формы тела водных животных. Это и вытянутая цилиндрическая (или слегка сжатая с боков) форма угревидных рыб, и разнообразные — симметричные и несимметричные — формы скомбриодных рыб (некоторые из них имеют форму аэродинамического профиля, близкого к идеальной классической схеме летательного аппарата), и форма тела, близкая к телу вращения, высокоскоростных дельфинов и кальмаров, и каплевидная форма тела огромных китов. Поверхность тела может быть гладкой или чешуйчатой, покрытой слизью. Движение может осуществляться у одних видов за счет изгибов тела или веслообразных движений боковых плавников, у других — гидрореактивной струей, выбрасываемой из своеобразного сопла. При всем разнообразии конструкций, форм, способов перемещения постоянными остаются высокая эффективность, экономичность, маневренность. Вокруг жесткой конструкции, перемещающейся в воде с относительно большой скоростью, возникает так называемое турбулентное движение частиц воды, т. е. завихрения и противотоки, создающие дополнительное сопротивление движущемуся телу. Идеальным обтеканием является ламинарное, когда струи воды плавно огибают тело, без отрывов от поверхности и без завихрений. Для движения морских животных как раз и характерна ламинаризация пограничного слоя воды. Это достигается за счет многих механизмов, часто действующих одновременно. Во-первых, животные, заселяющие гидросферу, в ходе эволюции приобрели формы, оптимальные для того диапазона скоростей, которыми они пользуются. Во-вторых, тело водных животных имеет специальное покрытие, резко снижающее лобовое сопротивление. В-третьих, у многих

водных животных кожный покров образует специфическую структуру, насыщенную рецепторами, сигнализирующими о поведении пограничного слоя воды, и мышцами, осуществляющими тонкую регуляцию кожных движений с целью гашения возникающих турбулентностей. В-четвертых, водные животные обладают способностью адаптивного изменения площади плавников, специфических телодвижений и тому подобными механизмами. Здесь далеко не все ясно конструкторам. Работа этого плана в гидробионике начата сравнительно недавно, но проводится интенсивно и целенаправленно.

Следует сказать, что некоторые успехи в этой области бионики уже достигнуты в чисто прикладном плане. Так, японские кораблестроители сообщили, что одна из фирм использовала при строительстве парохода «Куренаи Мару» форму обводов, соответствующую тем, которые характерны для большеголовых китов. Несмотря на необычный вид корпуса судна, пример достоин подражания: был получен выигрыш в мощности силовых установок судна до 15%.

Широкую известность получили результаты работ американского ученого М. О. Крамера, который создал ряд покрытий для твердых тел, движущихся в воде с большой скоростью. Для работ Крамера характерен сугубо бионический подход. Им были изучены структуры кожного покрова дельфинов и на основе полученных результатов анализа синтезированы покрытия типа «ламинфло».

Структура кожи дельфинов очень сложна. Для нее характерно мелкоячеистое строение верхнего покрова и наличие продольных упругих перегородок, заполненных жидким жировым составом. По аналогии с этим и покрытия Крамера представляют собой многослойную конструкцию из эластичного материала на основе резины. Между слоями расположены столбиковые или рейчатые опоры, а промежутки заполнены вязкой демпфирующей жидкостью. В соответствии с бионическими представлениями о работе кожного покрова дельфина внешняя резиновая диафрагма «ламинфло», будучи чувствительной к колебаниям давления, воспринимает турбулентные пульсации в пограничном слое и передает их вязкой демпфирующей жидкости, заполняющей промежутки между опорами, поддерживающими наружный слой покрытия. Тем самым энергия турбулентных пульсаций поглощается за счет упругих свойств резины и вязкой жидкости, что ведет к ламинаризации пограничного слоя воды. Экспериментальные исследования покрытий Крамера показали, что при тех же мощностях силовых установок подводная лодка и торпеда, корпус которых покрыт слоем «ламинфло», могут двигаться со значительно большей скоростью. Из этого не следует, что секреты кожного покрова дельфина полностью раскрыты. Конструкторы пока не получили тех результатов, на которые они рассчитывали. Это объясняется тем, что структура «ламинфло» является лишь грубым приближением к действительности. Эта пассивная система, лишенная возможностей саморегуляции, но первые шаги в должном направлении сделаны и сделаны довольно удачно.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕХАНИЗМОВ БИОХИМИИ И БИОФИЗИКИ

В основе протекания жизненных процессов лежат биохимические и биофизические явления. Выше уже говорилось о крайней сложности этих явлений в масштабах одиночной клетки. Живой организм в развитых его формах представляет собой ансамбль (множество)

клеток, синхронно выполняющих ряд взаимосвязанных задач. При этом возникают качественно новые явления, достигаются поразительные эффекты биохимического и биофизического превращения вещества. Многие из этих явлений требуют своей расшифровки и прикладного использования. Назовем здесь лишь некоторые, наиболее понятные и изученные явления и процессы, которые уже стали в той или иной степени предметом рассмотрения в бионике.

Ботаникам давно известны свойства многих растений селективно накапливать вполне определенное вещество. Это нашло свое практическое использование в двух направлениях. Во-первых, была составлена систематизация таких растений, которые, накапливая определенное вещество, изменяют форму или цвет. Сюда же вошли растения, которые произрастают только на почвах, богатых тем веществом, которое они накапливают. Такие растения были названы «индикаторами». Из названия следует и назначение проведенной систематизации — в ряде случаев растения-индикаторы довольно точно подсказывают геологам и другим специалистам состав почвы, приповерхностное залегание руд, границы месторождений обнаруженных ископаемых и другие сведения. Второе направление практического использования способности растений к селективному накоплению связано с промышленной добычей вещества из этих растений. Так, в годы второй мировой войны, когда мощное развитие радиоэлектроники потребовало значительного количества селена, оказалось, что промышленность не готова обеспечивать этим веществом запросы производства. Вот тогда ботаники и подсказали о существовании таких районов, как Долина смерти в Северной Америке, где не произрастают никакие растения, кроме одного вида травы, жадно усваивающей селен. Был срочно налажен процесс добычи селена из этих трав. Скошенную траву сжигали, а из золы, содержащей около 5% селена, извлекали это ценное вещество. Один гектар трав приносил при скашивании около 25 *кг* селена. Известно, что в ряде приморских стран таким же образом добывают из водорослей йод, бром и другие вещества. Высокая эффективность живых фильтров доказывается хотя бы таким показателем: морская капуста накапливает йод в количестве, в 100 000 раз большем, чем его содержание в воде, окружающей водоросли.

В последние годы стало известно, что не менее эффективно отфильтровывают и селективно накапливают ряд веществ многие животные — рыбы, моллюски и др.

Возникновение бионики свидетельствует о неизбежном наступлении такого периода, когда будут разгаданы и эти секреты живой природы, и не только разгаданы, но и использованы в технике добычи, обогащения и фильтрации вещества.

Нельзя исключать принципиальную возможность практического использования механизмов биофильтрации в бионических системах опреснения воды. Добыча пресной воды, пригодной для питья, для использования в быту и в промышленных целях, становится в наше время крупной и актуальной промышленной задачей, над решением которой работают многие научные и проектные организации. Хотя в последние годы в разных странах из соленой воды добывают ежегодно за счет опреснения более 100 000 $м^3$ пресной воды, этого все еще далеко не достаточно, а используемые опреснительные установки дороги и малоэффективны.

В бионике зафиксированы факты способности живых организмов опреснять воду. Обнаружены специальные железы в клювах ря-

да морских птиц, довольно точно расшифрована система фильтрации в почках млекопитающих. К числу бионических систем, реализующих механизмы такого рода фильтров, следует отнести аппаратуру «искусственная почка» и кремнийорганические полупроницаемые мембраны.

Правда, аппарат «искусственная почка», будучи прекрасным медицинским прибором, далеко не полностью повторяет работу живых почек, которые не ограничиваются только фильтрацией и выведением из организма ядов. Почки одновременно с основной работой выполняют ряд дополнительных и очень важных функций. Они вырабатывают аммиак и гиппуровую бензойную кислоту — вещества, которые обезвреживают многие яды. Почки выделяют ренин, обладающий свойством суживать кровеносные сосуды и таким образом влиять на общий уровень кровяного давления. Это пока еще недостижимо в «искусственной почке», но все же ряд основных функций почек живого организма этот аппарат успешно выполняет, что уже позволило спасти жизнь многим больным.

Созданию аппарата «искусственная почка» предшествовала длительная исследовательская работа, бионическая по своей идее, хотя, скорее всего, формально в наименовании исследований термин «бионика» еще не фигурировал. Трудами сотен и сотен исследователей было установлено, что основная структура почки складывается из огромного числа (около 10^6) нефронов — мельчайших клубочков, имеющих в свою очередь достаточно сложную структуру. Каждый нефрон состоит из тончайших кровеносных сосудов, заключенных в общую капсулу. По относительно широкому каналу (артерии) кровь поступает в нефроны. Жидкая ее часть (сыворотка) относительно легко просачивается сквозь стенки капилляров в выходные канальцы. Крупные молекулы белка, содержащиеся в сыворотке, не проходят сквозь фильтр. Таким образом организм очищается от всех ненужных и вредных веществ, которые попадают в кровь и разносятся с ней по телу, в том числе от вирусов микробов и их ядов. Но это только первый этап работы почки. Далее прошедшая в канальцы сыворотка всасывается клетками и насыщается недостающими элементами, после чего выбрасывается в общий ток крови. В течение суток через почечные клубочки проходит около 180 *л* фильтрата. Чуть менее 1% отводится в собирательные трубочки и вместе с отфильтрованными веществами выводится из организма.

В аппарате «искусственная почка» имеется система полупроницаемых мембран, через которые свободно проходят мелкие составные части и задерживаются все крупные молекулы, например эритроциты (красные кровяные шарики). Трубки аппарата присоединены к венам человека. Кровь больного, проходя через фильтры аппарата, очищается от всех крупных составляющих, а на выходе из аппарата в нее вводятся все недостающие полезные биохимические компоненты. Очищенная и обогащенная кровь вновь поступает в организм больного.

Конечно, аппарат «искусственная почка» является громоздким стационарным сооружением и не конкурирует ни по размерам, ни по комплексу выполняемых функций с живыми почками. Но основная функция почек в аппарате реализована успешно.

Близки к вопросам опреснения воды и вопросы селективного газообмена, фильтрации газов. Принципиальную сторону сходства этих вопросов подтверждает подобие экспериментальных бионических систем. Так, уже упоминавшаяся кремнийорганическая мембра-

на позволяет решать не только задачу опреснения воды, но и задачу направленного газообмена: через мембрану во встречном направлении диффундируют кислород и углекислый газ. Это позволяет, например, сделать стены помещения из кремнийорганических мембран таким образом, что внутрь помещения будет непрерывно поступать кислород, а из помещения по мере накопления будет удаляться углекислый газ.

Биологическим прообразом полупроницаемой мембраны для направленного газообмена может служить кожа лягушки. Экспериментально доказано, что лягушка и после удаления легких может довольно долго жить в воде, используя для дыхания кожу своего тела. Однако пока еще отсутствует бионическая расшифровка этого механизма газовой фильтрации.

Рассматривая биоэнергетические проблемы бионики, следует специально оговорить следующее. Может сложиться впечатление, что в наше время, в эпоху атомной энергетики не имеет смысла бионический поиск путей построения энергетических систем. Однако подобное представление так же ошибочно, как и мнение о бесполезности изучения живых локаторов на фоне существующей, хорошо развитой современной радиолокации и гидролокации. Перед энергетиками остро стоит проблема создания широкого ассортимента малогабаритных, экономичных и дешевых источников питания. Нельзя исключать возможности бионики и в этом ее направлении. Кроме того, несомненно, актуальная задача объяснения принципов работы электромагнитных радаров некоторых водных животных (таких, как нильский длиннорыл) прямо требует проведения исследований энергетической части этой интересной, но загадочной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая брошюра представляет собой попытки популярного изложения основных идей бионики как нового раздела науки и техники. Эти идеи, как и бионический подход к созданию кибернетических устройств, являются, вероятно, одним из наиболее перспективных путей преодоления таких недостатков современных электронных машин, как негибкость их поведения в незапрограммированных заранее ситуациях, неспособность к анализу явлений внешней среды, узость и односторонность каналов ввода информации, низкая экономичность и надежность.

Стремление почерпнуть идеи для дальнейшего развития кибернетической техники из органического мира объясняется исключительно высоким совершенством биологических организмов, обусловленным миллиардами лет эволюционного развития и естественного отбора.

Именно на этом пути следует ожидать новых выдающихся открытий в физиологии высшей нервной деятельности животных и человека и новых достижений в применении этих открытий для создания кибернетических машин.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 37 коп.